

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**PADRÕES DE ESCOAMENTO DE FLUIDO DE
MISTURA ÁGUA-SEDIMENTOS EM LÂMINA
DE POUCA ESPESSURA**

JORGE LUIS ZEGARRA TARQUI

Tese Submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como Requisito Parcial para Obtenção do Título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre, Janeiro de 2001

A Eraly por su compromiso con la vida, a Diego por su risa, su llorar, sus travesuras, sus mañas, sus besos e abrazos. En fin, por todo eso que es parte de su mundo de niño y que me recuerda que para vivir se necesita de tan poco.

A mis padres y hermanos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação da Professora Ana Luiza de Oliveira Borges e co-orientado pelo Prof. José Miguel Reichert da Universidade Federal de Santa Maria.

Expresso meus agradecimentos à Prof. Ana Luiza Borges pela orientação e confiança depositada.

À minha Família, em especial Eraly e Diego, pelo amor e pela paciência de suportar o tempo transcorrido longe deles.

Aos professores Paulo Kroeff de Souza, Rogério Maestri, Marcelo Marquez e Luiz Magalhães Endres pela ajuda na elaboração desta Tese.

Aos colegas da sala de Erosão e Sedimentação Gustavo Merten, Carlos Alberto Rockenbach, Amauri Barcelos e Walter Collischonn e ao funcionário Bruno Rocha pela amizade e pelo apoio constante.

Aos colegas Jaime F. Gomes e Vladimir Caramori pela disponibilidade e partilha.

Aos amigos Patrícia, Tânia, Luís e Ana pela amizade.

A todos os colegas, professores e funcionários do IPH pela amizade e cordialidade oferecida.

Ao CNPq que financiou este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho visou estabelecer uma metodologia de avaliação dos padrões de escoamento de fluidos de mistura água- sedimento em lâminas de pouca espessura. Neste estudo foram estabelecidas hipóteses que consideram que as características do sedimento (massa específica e textura) e a composição mineralógica do sedimento afetam as propriedades reológicas do fluido de mistura, assim como a capacidade de transporte de sedimento grosso em suspensão (mudança na velocidade de queda de sedimentos dentro do fluido de mistura), tendo efeito direto sobre as características dinâmicas do escoamento (perfil de velocidade).

Os sedimentos analisados foram obtidos de três tipos de solos do estado do Rio Grande do Sul: Brunizém Vertico (Bv), Terra Roxa (Tr) e Vertissolo (V). O critério de escolha destes solos foi a diferenciação entre as características de textura e mineralogia.

O desenvolvimento desta pesquisa foi dividida em várias etapas: caracterização do sedimento empregado, determinação das propriedades reológicas dos fluidos de mistura de água-sedimento fino, cálculo da velocidade de queda de sedimentos grosso em um fluido de mistura água-material fino e a determinação dos perfis de velocidades e concentrações em um escoamento com sedimento em suspensão.

Para a realização deste trabalho foi necessário o desenvolvimento de equipamentos de medição da velocidade de queda, de medição do perfil de velocidades e concentrações. O primeiro equipamento construído foi da medição da velocidade de queda e é similar ao desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Griffith, o qual é denominado tubo de Griffith. O equipamento para medição do perfil de velocidade é constituído por uma sonda de Pitot conectada a um piezômetro inclinado. O sistema de amostragem de sedimentos é composto por uma sonda tipo Pitot, cujo funcionamento é garantido por sifonamento.

As propriedades reológicas das amostras de fluido de água-material fino para os três tipos de solo (Bv, Tr e V) mostraram que as amostras do solo Bv apresentaram erros de medição devido à natureza siltosa do solo. Com o aumento da concentração, foi observado um aumento da viscosidade, sendo este incremento mais predominante nas amostras do solo V (esmectítico) em relação às amostras do solo Tr (caulinítico).

As velocidades de queda de material grosso (classes areia média, areia fina e areia muito fina) calculadas em água limpa apresentaram diferenças consideráveis em relação às velocidades

calculadas teoricamente. O cálculo da velocidade de queda de material grosso dentro de um fluido de mistura água-material fino ficou restrito à classe da areia média.

O sistema de medição do perfil de velocidades permitiu obter coeficientes de Von Karman (k) - ajustes da equação da “lei da parede” ou dos “déficits da velocidade”- similares aos encontrados na literatura para água limpa. Ao se avaliar o perfil de velocidades para escoamentos com sedimento em suspensão, em uma análise que considerou a característica do sedimento, observou-se que solos com textura arenosa (solo Bv) apresentam um coeficiente k que decresce com o aumento da concentração. Este comportamento é similar ao observado por Wang e Plate (1994) e outros. Nos escoamentos correspondentes aos solos Tr e V (argilosos) foi observado um comportamento contrário a do solo Bv: o valor de k sofreu acréscimo com o aumento da concentração. Fisicamente, uma diminuição do valor k com o aumento da concentração (solo Bv) significará um aumento da declividade do perfil de velocidade (expressos nos termos de u/u^* e yu^*/ν). Na ocorrência de acréscimo no valor de k com o aumento da concentração ocorre uma diminuição da declividade do perfil de velocidade. Numa análise que considera a mineralogia do sedimento, foi possível observar que os valores de k, solos esmectíticos (V), apresentaram maior suscetibilidade ao aumento concentração que os solos caulitico (Tr). Este resultado coincide com o observado nas propriedades reológicas.

Estes resultados permitiram concluir que existe evidência da mudança dos padrões de escoamento (perfil de velocidade) devido à ação de sedimento em suspensão é mais predominante em solos do tipo esmectítico que em solo cauliniticos. Sedimentos em suspensão (solo Bv) com textura arenosa originaram um comportamento de perfil de velocidade contrário ao observado em perfis de velocidade de sedimentos de solos argilosos (Tr e V).

Não foi possível determinar o perfil de concentrações devido a problemas originados pela pouca espessura da lâmina do escoamento, impossibilitando um análise mais detalhada do sedimento em suspensão. A mesma impossibilidade ocorreu para a análise do efeito do sedimento fino no transporte de material grosso em suspensão.

ABSTRACT

The present work tried establish a methodology of evaluation of the flow pattern of water-sediment mixture fluid in shallow flow. The working hypothesis advanced is that the sediment characteristics (specific mass and texture) and the sediment minerological composition affect the rheological proprieties of mixture fluid, just as the transport capacity of suspended coarse sediment (change in the settling velocity of sediment in mixture fluid), effects directly the flow dynamic (velocity profile).

The sediment analysed was of three soil types coming from the Rio Grande do Sul State of Brazil: Brunizém Vertico (Bv), Terra Roxa (Tr) e Vertissolo (V). They were chosen according to the differences both in the textural and minerological characteristics.

This research was divided into several stages: used sediment characterization, determination of the rheological proprieties of the water-fine sediment mixture fluids, calculation of the settling velocity values of coarse sediment in water-fine sediment mixture fluid, and determination of the velocity profile and of the concentration vertical distribution in suspended sediment flow.

To carry out this work it was necessary to develop measurement equipments of settling velocity, velocity profile and concentration vertical distribution. We started by measuring the settling velocity, using a type of equipment similar to the Griffith tube, created by researchers of Griffith University. The velocity profile equipment was a Pitot probe conected to an inclined manometer. The system of sediment sampling was performed using a Pitot probe, also for siphon suction.

The rheological proprieties of the samples of water-fine sediment mixture fluid of the three soil types (Bv, Tr and V) showed that the Bv soil samples presented measurement errors due to its silty character. With the increment of concentration a increase of the viscosity was observed, more predominant in the V soil samples (Esmectic), than inthe Tr soil samples (Kaolinite).

The settling velocities of coarse sediment (classes: medium sand, fine sand and very fine sand) calculated to water clear displayed many differences with the theorical velocity values. The determination of settling velocity of coarse sediment in water-fine sediment mixture fluid stayed restricted to medium sand class.

The sistem of measurement of velocity profile allowed us to obtain of Von Karman coeficient (k) – fitted equations of the wall law and velocity defect law – with similar k values of

the water clear. When the velocity profile was evaluated in order to take into consideration the sediment characteristics, it was found that the soil with sandy texture (Bv) presented a k coefficient that decreases with the increase of concentration. This was similar to Wang and Plates observations (1994), and other researchers. In the flows corresponding to Tr na V soil (Clayen) the results were the opposite: the k value increased with the increase of concentration. Physically, the decrease of the k value with the increase of concentration (Bv soil) denotes an increase of slope of the velocity profile (in terms of u/u^* and yu^*/ν), while with the increase of the k value a decrease of slope of velocity profile takes place. In the analysis of the sediment minerology, it was possible to observe that k values of esmectitic soil (V), were more easily affected with an increase of concentration than the kaolinite soil (Tr). These results coincide with the observations of the rheological proprieties, and allow us to conclude that there were evidences of changes of flow patterns (velocity profile) due to the action of suspended sediment, more predominant in esmectic soil than in the kaolinite soil. The suspended sediment (Bv soil) with sandy texture exhibited a velocity profile opposed to the velocity profiles of clay soils (Tr and V).

It was not possible to determine the concentration vertical distribution, owing to problems created by the shallow stream, that impede a more detailed analysis of suspended sediments. A similar problem occurred when analysing of the fine sediment effect on suspended coarse sediment transport.

SUMÁRIO

Lista de Tabelas	xii
Lista de Figuras	xvi
Lista de Símbolos	Xxii
CAPÍTULO 1	
1.1. Introdução	01
CAPÍTULO 2. Justificativas Hipóteses e Objetivos	
2.1. Justificativas	02
2.2. Hipóteses e Objetivos	03
2.2.1. Hipóteses	03
2.2.2. Objetivos	03
CAPÍTULO 3. Considerações Teóricas	
3.1. Perfil de Velocidade Turbulento em Canal Aberto	05
3.2. Efeito da presença de Sedimentos sobre o Perfil de Velocidades	07
3.3. Propriedades Físicas da Mistura Água-Sedimento	10
3.3.1. Massas específicas	11
3.3.2. Viscosidade cinemática	11
3.3.3. Velocidade de queda de partículas grossas em um fluido com sedimento em suspensão	19
3.3.4. Velocidade cisalhante	21
3.3.5. Perfil de concentração	22
CAPÍTULO 4. METODOLOGIA	
4.1. Apresentação	25
4.2. Seleção dos Solos	27
4.3. Caracterização do Sedimentos	28
4.4. Propriedades Reologicas dos Sedimentos Finos em Suspensão	29
4.4.1. Preparo das amostras	29
4.4.2. Sistema de medição das propriedades reológicas	29
4.4.3. Testes de tixotropia e reopexia	31
4.4.4. Levantamento de reogramas	31
4.5. Concepção e Construção dos Equipamentos	32

4.5.1. Tubo de Griffith	32
4.5.2. Canal de declividade variável	36
4.5.3. Sistema de medição de velocidade	37
4.5.4. Amostrador de sedimentos	41
4.6. Determinação da Velocidade de Queda dos Sedimentos Grossos em um Fluido Estagnado com Material Fino em Suspensão	42
4.7. Estudo de Perfis de Velocidades e Concentrações em Fluxo com Sedimentos em Suspensão	47
4.8. Estudo do Perfis de Concentrações em Fluxo com Sedimento em Suspensão	51
CAPÍTULO 5. Resultados	
5.1. Considerações Gerais	52
5.2. Propriedades dos Sedimentos	52
5.3. Propriedades Reológicas	56
5.3.1. Testes de tixotropia e reopexia	56
5.3.2. Tratamento de dados do viscosímetro	57
5.3.3. Reogramas	59
5.4. Determinação da Velocidade de Queda dos Sedimentos Grossos em Fluido Estagnado com Material Fino em Suspensão	85
5.4.1. Tempo de cada teste	85
5.4.2. Processo de cálculo da velocidade de queda	86
5.4.3. Resultados comparativos entre o sistema automático e manual de admissão da amostra	87
5.4.4. Resultados da escolha da quantidade padrão de sedimento grosso a se empregar	89
5.4.5. Resultados da medição da velocidade de queda em água limpa	90
5.4.6. Resultados dos testes de medição da velocidade de queda de material grosso em água com material fino em suspensão	92
5.5. Estudo do Perfil de Velocidades em Fluxo com sedimentos em Suspensão	101
5.5.1. Resultados dos testes preliminares	101
5.5.2. Procedimento para o cálculo do perfil de velocidades no canal com água limpa	102
5.5.3. Resultados do perfil de velocidades para água limpa	107

5.5.4. Fontes de erro de medição	109
5.5.5. Resultados do perfil de velocidade para um fluxo com sedimento em suspensão	125
5.5.6. Resultados de perfil de concentrações para um fluido com água limpa e sedimento em suspensão	149
CAPÍTULO 6. Resumo dos Resultados, Conclusões e Recomendações	
6.1. Resumo dos Resultados e Conclusões	153
6.2. Recomendações	159
7. Bibliografia	160
ANEXOS	
Anexo A. Análise do Solo e Propriedades dos Sedimentos	A1
Anexo B. Análise da Água	B1
Anexo C. Propriedades Reológicas	C1
Anexo D. Procedimento experimental no Tubo de Griffith	D1
Anexo E. Procedimento da Medição dos Perfis de Velocidades e Concentrações	E1

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Valores experimentais das constantes A, k e B.....	6
Tabela 3.2. Variáveis importantes no cálculo do perfil da velocidade.....	10
Tabela 3.3 Equações reológicas.....	14
Tabela 4.1.- Resumo da metodologia: etapas, atividades, objetivos e resultados.....	26
Tabela 4.2. Características dos solos empregados.....	27
Tabela 4.3 Resumo de testes programados para calculo de velocidade de queda em água limpa.....	44
Tabela 4.4 Resumo do total de testes para determinar o efeito da concentração na velocidade de queda de material grosso.....	47
Tabela 4.5. Resumo dos testes de medição do perfil de velocidade para escoamento com sedimento em suspensão.....	50
Tabela 4.6. Resumo dos testes de medição do perfil de concentrações para escoamento com sedimento em suspensão.....	51
Tabela 5.1. Porcentagem de material grosso e fino para cada tipo de solo.....	52
Tabela 5.2. Peso e porcentagem parcial das classes areia média, areia fina e areia muito fina para cada tipo de solo.....	53
Tabela 5.3. Peso parcial e porcentagem de peso de silte e argila para cada tipo de solo.....	54
Tabela 5.4. Massa específica do material fino e material grosso por classes para solo Bv, Tr e V.....	57
Tabela 5.5. Resumo dos resultados das amostras do solo Bv.....	60
Tabela 5.6.a. Erros relativos dos parâmetros reológicos entre os diferentes testes	

para $C_v=1,26$ do solo Bv.....	61
Tabela 5.6.b. Deformação angular e %torque maiores ou menores de 10% para solo Bv	61
Tabela 5.6.c. Resumo da análise do intervalo de confiança, com 95% de probabilidade, do solo Bv para $C_v=1,26\%$	63
Tabela 5.7. Resumo da análise de resíduos do solo Bv para $C_v=1,26\%$	65
Tabela 5.8.a. Resumo das amostras do solo Tr ($C_v=5,96\%$).....	67
Tabela 5.8.b. Resumo das amostras do solo Tr ($C_v=2,74\%$ e $C_v=0,94\%$).....	67
Tabela 5.9.a. Erros relativos dos parâmetros reológicos entre os diferentes testes para $C_v=5,96, 2,74$ e $0,94$ do solo Bv.....	68
Tabela 5.9.b. Resumo Ds e % de torque maior e menor que 10% para solo Tr.....	68
Tabela 5.9.c. Resumo da análise do intervalo de confiança, 95% de probabilidade, do solo Tr para $C_v=0,94$	69
Tabela 5.9.d. Resumo da análise do intervalo de confiança, 95% de probabilidade, do solo Tr para $C_v=2,74\%$	70
Tabela 5.9.e. Resumo da análise do intervalo de confiança, 95% de probabilidade, do solo Tr para $C_v=5,96\%$	70
Tabela 5.10.a. Resumo da análise de resíduos do solo Tr para $C_v=0,94\%$	72
Tabela 5.10.b. Resumo da análise de resíduos do solo Tr para $C_v=2,74\%$	73
Tabela 5.10.c. Resumo da análise de resíduos do solo Tr para $C_v=5,96\%$	73
Tabela 5.11.a Resumo do solo V ($C_v=7,07\%$).....	75
Tabela 5.11.b Resumo do solo V ($C_v=3,72\%$ e $C_v=1,42\%$).....	75
Tabela 5.12.a. Erros relativos dos parâmetros reológicos entre os diferentes testes do solo V ($C_v=7,07\%, 3,72\%$ e $1,42\%$)	76

Tabela 5.12.b. Resumo Ds e % de torque maior e menor que 10% para solo V.....	76
Tabela 5.12.c. Resumo da análise do intervalo de confiança do solo V para Cv=1,42%.....	77
Tabela 5.12.d. Resumo da análise do intervalo de confiança do solo V para Cv=3,72%.....	78
Tabela 5.12.e. Resumo da análise do intervalo de confiança do solo V para Cv=7,07%.....	78
Tabela 5.13.a. Resumo da análise de resíduos do solo V para Cv=1,42%.....	80
Tabela 5.13.b. Resumo da análise de resíduos do solo V para Cv=3,72%.....	81
Tabela 5.13.c. Resumo da análise de resíduos do solo V para Cv=7,07%.....	81
Tabela 5.14. Variação da viscosidade relativa com a concentração volumétrica para solos Tr e V.....	83
Tabela 5.15. Tempo total empregado para cada teste.....	85
Tabela 5.16. Exemplo do processo de cálculo da velocidade queda, areia muito fina para solo Bv em água limpa a 19 °C.....	86
Tabela 5.17. Resultados comparativos da velocidade de queda experimental e teóricas para água limpa.....	91
Tabela 5.18. Resumo dos testes realizados para o material grosso em água com material fino em suspensão para os solos Bv, Tr e V.....	92
Tabela 5.19 . Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do solo Bv.....	94
Tabela 5.20. Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do solo Tr.....	96
Tabela 5.21 . Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do	

solo V.....	98
Tabela 5.22. Resumo dos testes realizados para água limpa.....	107
Tabela 5.23.a. Erros de medida da velocidade para água limpa (declividades 5% e 8,7%)	111
Tabela 5.23.b. Erros de medida da velocidade para fluido de mistura água-sedimento para declividade de 5%.....	111
Tabela 5.23.c. Erros de medida da velocidade para fluido de mistura água-sedimento para declividade de 8,7%.....	112
Tabela 5.24. Resultados dos cálculos de k e B da lei da parede.....	119
Tabela 5.25. Resultados dos cálculos de k e Π da lei dos déficits da velocidade.....	122
Tabela 5.26. Comparação do valor do coeficiente de Von-Karman calculado pelas equações da lei da parede e dos déficits da velocidade.....	123
Tabela 5.27. Viscosidades calculadas por interpolação linear (solo Tr e V) e calculados pelo modelo Chu Junda (solo Bv).....	128
Tabela 5.28. Resumo dos testes realizados para solo Bv.	129
Tabela 5.29. Resumo dos coeficientes calculados para as equações da lei da parede e dos déficits da velocidade.....	131
Tabela 5.30. Resumo de todos os testes realizados para solo Tr.....	134
Tabela 5.31. Resumo dos coeficientes calculados para as equações da lei da parede e dos déficits da velocidade para solo Tr.....	136
Tabela 5.32. Resumo de todos os testes realizados para solo V.....	138
Tabela 5.33. Resumo dos coeficientes calculados para as equações da lei da parede e dos déficits da velocidade para solo V.....	140
Tabela 5.34. Resultados do coletor de sedimentos para solo Bv.....	149

Tabela 5.35. Resultados do coletor de sedimentos para solo Tr.....	150
Tabela 5.36. Resultados do coletor de sedimentos para solo V.....	151
Tabela 6.1. Resumo dos resultados das amostras do solo Bv.....	153
Tabela 6.2.a. Resumo das amostras do solo Tr (Cv=5,96 %)......	153
Tabela 6.2.b. Resumo das amostras do solo Tr (Cv=2,74 % e Cv=0,94 %)......	154
Tabela 6.3.a. Resumo do solo V (Cv=7,07%)......	154
Tabela 6.3.b. Resumo do solo V (Cv=3,72% e Cv=1,42%)......	154
Tabela 6.4. Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do solo Bv.....	155
Tabela 6.5. Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do solo Tr.....	155
Tabela 6.6. Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do solo V.....	156
Tabela 6.7. Resumo dos resultados do perfil de velocidades para água limpa e os solos Bv, Tr e V.....	157
Tabela A.1 Análise básica dos solos Brunizém Vertico (Bv), Terra Roxa (Tr) e Vertissolo (V).....	A2
Tabela A.2.- Resultado geral das massas específicas dos sedimentos Bv, Tr e V.....	A3
Tabela C.1. Dimensões características do viscosímetro.....	C2

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Resultados de Coleman, (a) k versus ϕ e (b) Π versus ϕ	8
Figura 3.2. Fluxo de fluido, formação do gradiente de velocidade devido à ação da força F ...	12
Figura 3.3. Reogramas de diferentes tipos de fluidos: newtoniano (A), pseudo-plástico (C), dilatante (D), plástico ou de Bingham (B) e pseudo-plástico com tensão de escoamento (E).....	13
Figura 3.4. Tixotropia em fluidos de Bingham.....	15
Figura 3.5. Reopexia em fluidos de Bingham.....	15
Figura 4.1. Viscosímetro de cilindros concêntricos.....	30
Figura 4.2. Partes do Tubo de Griffith	33
Figura 4.3. Vista total do Tubo de Griffith	34
Figura 4.4. Sistema de entrada de amostra manual.	35
Figura 4.5. Sistema de coleta, a) Bandeja maior giratória com recipientes de coleta e b) detalhe do recipiente de coleta.....	36
Figura 4.6. Vista do canal.....	37
Figura 4.7. Sonda tipo Pitot concepção teórica.....	38
Figura 4.8. Sonda tipo Pitot: a) vista do conjunto: estrutura de suporte, paquímetro para medição, acrílico com tomada de mangueira e sonda; b) Detalhe da sonda, mostrando a ponta linimétrica acoplada.....	38
Figura 4.9. Detalhe do piezômetro inclinado conectado à sonda tipo Pitot.....	40
Figura 4.10. a) Tubo coletor de sedimentos e b) vista das duas estruturas mecânicas de suporte para o tubo de Pitot e tubo coletor de sedimento.....	42
Figura 5.1. Curvas granulométricas do material grosso (areia) para os solos Bv, Tr e V.....	54

Figura 5.2. Curvas Granulometricas do material fino (silte e argila) para os solos Bv, Tr e V.....	55
Figura 5.3.a. Reograma do solo Bv ($C_v=1,26\%$ e $T=27,3\text{ }^\circ\text{C}$).....	64
Figura 5.3.b. Distribuição dos resíduos para o solo Bv ($C_v=1,26\%$ e $T=27,3\text{ }^\circ\text{C}$)	66
Figura 5.4.a. Reograma do solo Tr ($C_v=5,96\%$, $C_v=2,74$ e $C_v=0,94\%$).....	71
Figura 5.4.b. Distribuição dos resíduos para solo Tr ($C_v=5,96\%$, $C_v=2,74\%$ e $C_v=0,94\%$)	74
Figura 5.5.a. Reogramas do solo V ($C_v=1,42$; $C_v=3,72\%$ e $C_v=7,07\%$).....	79
Figura 5.5.b. Distribuição de resíduos do solo V ($C_v=1,42\%$; $C_v=3,72\%$ e $C_v=7,77\%$)	82
Figura 5.6. Curvas comparativas da variação da viscosidade com a concentração volumétrica para os solo Tr e V.....	84
Figura 5.7. Exemplo de cálculo da velocidade de queda média.....	87
Figura 5.8. Gráfico comparativo entre os dois tipos de sistemas de entrada testados para areia média para solo Bv.....	88
Figura 5.9. Gráfico comparativo entre os dois tipos de sistemas de entrada testados para areia média para solo Tr.....	89
Figura 5.10. Gráfico comparativo da velocidade de queda para diferentes quantidades de amostra de areia fina (solo Bv), em água limpa (27°C) para quantidades 2, 5 e 10 gramas.....	90
Figura 5.11. Resultados da velocidade de queda para AF do solo V para água limpa ($T=23^\circ\text{C}$) e para fluido de mistura água-material fino reciclado com $C_v=7,11\%$ ($T=26^\circ\text{C}$).....	93
Figura 5.12. Efeito da concentração sobre a velocidade de queda adimensionalizada para solo Bv (classes AM, AF e AMF).....	95
Figura 5.13. Efeito da concentração sobre na velocidade de queda adimensionalizada para	

solo Tr (classes AM, AF e AMF).....	97
Figura 5.14. Efeito da concentração sobre a velocidade de queda adimensionalizada para solo V (classes AM, AF e AMF).....	98
Figura 5.15. Curvas teóricas do comportamento da velocidade de queda adimensional com a concentração para as classe em estudo de AM, AF e AMF.....	100
Figura 5.16. Distribuição dos perfis de velocidade transversal no canal para três diferentes alturas referentes ao fundo (y=1mm, y=3mm e y=5mm).....	102
Figura 5.17. Calibração estática em água limpa.....	104
Figura 5.18. Cálculo da velocidade em água limpa.....	106
Figura 5.19. Perfil de velocidades medidos para água limpa, declividade 5%.....	108
Figura 5.20. Perfil de velocidades medidos para água limpa, declividade 8,7%.....	108
Figura 5.21. Distribuição de erros de velocidade.....	113
Figura 5.22. Comparação das velocidades experimentais e teóricas (lei da parede) para declividade 5 % com água limpa para 28 °C (teste ALD5(1)).....	114
Figura 5.23. Gráfico comparativo dos perfis de velocidade experimental e teórico (lei da parede) ambos para o teste ALD5(1).....	115
Figura 5.24. Comparação das velocidades experimentais e teóricas (lei da parede) para água limpa, declividade 8,7% e para 28 °C. Teste ALD8 (1).....	116
Figura 5.25. Gráfico comparativo entre os Perfis de velocidade experimental e teórico (lei da parede) para o teste ALD8 (1) para declividade 8,7 %	117
Figura 5.26. Comparação dos perfis de velocidade adimensional dos testes ALD5(1) e ALD8(1).....	117
Figura 5.27. Perfis de velocidades experimentais adimensionalizadas para água limpa, declividade 5%.....	118

Figura 5.28. Perfis de velocidades experimentais adimensionalizadas para água limpa, declividade 8,7%.....	118
Figura 5.29 . Variação do coeficiente de Von Karman (k) com o Re_m para água limpa.....	120
Figura 5.30 . Variação do coeficiente de B com o Re_m para água limpa.....	120
Figura 5.31 . Variação do coeficiente k' com o Re_m para água limpa.....	122
Figura 5.32 . Variação do coeficiente Π com o Re_m para água limpa.....	123
Figura 5.33 . Perfis de velocidade para água limpa e declividade 5%.....	124
Figura 5.34 . Perfis de velocidade para água limpa e declividade 8,7%.....	124
Figura 5.35. Esquema para o cálculo do perfil de velocidade para escoamento com fluido de mistura água-sedimento em suspensão.....	127
Figura 5.36. Perfis de velocidades: teórico ALD5 (1) (lei da parede), água limpa ALD5 (1), Bv1 com $C_v=0,34$ e Bv2 com $C_v=1,09$. Solo tipo Bv e declividade 5%.....	130
Figura 5.37. Perfis de velocidades adimensionais: teórico ALD8 (lei da parede), água limpa ALD5(1), Bv3 $C_v=0,51$ e Bv4 $C_v=1,35$ para solo tipo Bv e declividade 8,7%.....	131
Figura 5.38. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD3 (1) (lei da parede), água limpa ALD3 (1), Bv1 com $C_v =0,34\%$ e Bv2 com $C_v=1,09\%$ para solo tipo Bv (declividade 5%).....	133
Figura 5.39. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD5 (1) (lei da parede), água limpa ALD5 (1), Bv1 com $C_v=0,51\%$ e Bv2 com $C_v=1,35\%$ para solo tipo Bv (declividade 8,7 %).....	133
Figura 5.40. Perfis de velocidades adimensionais: teórico ALD5(1) (lei da parede), experimental ALD5(1), Tr1 com $C_v=1,23\%$, Tr2 com $C_v=1,23\%$, Tr3 com $C_v=2,89\%$ e Tr4 com $C_v=5,96\%$ para solo tipo Tr e declividade 5%.....	135
Figura 5.41. Perfis de velocidades adimensionais: teórico ALD8(1) (lei da parede),	

experimental ALD8%, Tr 5 com Cv=1,33, Tr7 com Cv=2,82 e Tr8 com Cv=5,97% para solo Tr e declividade 8,7 %.....	135
Figura 5.42. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD5 (1), água limpa ALD5 (1) com Cv=0, Tr1 com Cv=1,23, Tr2 com Cv=1,23%, Tr3 com Cv=2.89% e Tr4 com Cv=5.96% para solo tipo Tr e declividade 5%.....	137
Figura 5.43. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD8 (1) (lei da parede), água limpa ALD8 (1), Tr5 com Cv=1,33%, Tr7 com Cv=2.82% e Tr8 com Cv=5.97% para solo tipo Tr e declividade 8.7 %.....	137
Figura 5.44. Perfis de velocidades adimensionais: teórico ALD5 (1) (lei da parede), água limpa ALD5 (1)), V1 com Cv=1,56%, V5 com Cv=4,25% e V8 com Cv=7,22% para solo tipo V e declividade 5%.....	139
Figura 5.45. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD8 (1) (lei da parede), água limpa ALD8 (1), V10 com Cv=1,72%, V13 e V16 com Cv=4,1% e V18 com Cv=6,86% para solo tipo V e declividade 8,7 %.....	139
Figura 5.46. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD3 (1)(lei da parede), água limpa ALD5 (1), V1 com Cv 1,56%, V5 com Cv=4,25% e V8 com Cv=7,22% para solo tipo V e declividade 5%.....	141
Figura 5.47. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD8 (1) (lei da parede), água limpa ALD5 (1), V10 com Cv 1,72%, V13 e V16 com Cv=4.1% e V18 com Cv=6.86% para solo tipo V, declividade 8,7 %.....	141
Figura 5.48. Variação de k (lei da parede) com respeito a concentração volumétrica Cv para os três tipos de solo Bv, Tr e V.....	142
Figura 5.49. Variação de B (lei da parede) com respeito a concentração volumétrica Cv para os três tipos de solo Bv, Tr e V.....	143

Figura 5.50. Variação de k (lei da parede) com respeito a Reynolds para os três tipos de solo Bv, Tr e V.....	144
Figura 5.51. Variação de B (lei da parede) em relação a Reynolds para os três tipos de solo Bv, Tr e V.....	145
Figura 5.52. Variação de k (lei dos déficits da velocidade) em relação à concentração volumétrica para os três tipos de solo Bv, Tr e V.....	146
Figura 5.53. Variação de Π (lei dos déficits da velocidade) em relação à concentração volumétrica para os três tipos de solo Bv, Tr e V.....	147
Figura 5.54. Variação de k (lei dos déficits da velocidade) em relação a Reynolds para os três tipos de solo Bv, Tr e V.....	148
Figura 5.55. Variação de Π (lei dos déficits da velocidade) em relação a Reynolds para os três tipos de solo Bv, Tr e V.....	148
Figura E.1.- Recipiente de acrílico para calibração estática	E2
Figura E.2.- Detalhe do Pitot mergulhado no recipiente de acrílico.....	E3
Figura E.3.- Detalhe do menisco de medição no tubo do piezômetro inclinado.....	E4
Figura E.4.- Medição da lâmina no recipiente de calibração.....	E4
Figura E.5.- Tubo Pitot: a) submerso no escoamento e, b) medição da altura da lâmina do escoamento.....	E5

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Constante equação da “lei da parede”
A_v	Ponto de referencia
a'	Diâmetro do cilindro interno do viscosímetro de cilindros concêntricos
B	Constante da equação da “lei da parede”
B_v	Brunizém Vértico
b	Largura do canal
b'	Diâmetro interno do cilindro externo do viscosímetro de cilindros concêntricos
$C_{v\delta}$	Concentração volumétrica no ponto $y=\delta$
C_{v_0}	Concentração volumétrica no ponto $y=0$
C_a	Concentração na profundidade y_a
C_d	Coefficiente de arraste
d	Diâmetro das partículas ou classe em análise
d_i	Diâmetro médio da partícula i
d^*	Diâmetro de partícula adimensionalizada
d'^*	Diâmetro de partícula adimensionalizada dentro de fluido com sedimento em suspensão
d_{50}	Diâmetro médio da curva granulométrica
D_s	Taxa de deformação angular
E	Termo equivalente a $\frac{I}{\tau_{\text{médio_calculado}}} \times 100$
F	Força
$f(\tau)$	Função reológica
F_e	Força de peso efetivo
F_d	Força de arraste
g	gravidade em cm/s^2
h	Altura total do escoamento no canal
h'	Altura do cilindro interno do viscosímetro de cilindros concêntricos
$h_{\text{total_água}}$	Altura total de água equivalente à altura total do escoamento

h_{total_m}	Altura total do escoamento com sedimento em suspensão
h_m	Altura estática do escoamento com sedimento em suspensão
$h_{velocidade_equivalente}$	Altura dinâmica equivalente
$H_{total\ no\ piezômetro\ inclinado}$	Altura total de água sobre o tubo inclinado
$H_{total\ vertical}$	Altura total vertical
$H_{total\ no\ piezômetro\ inclinado\ com\ sedimento}$	Altura total no piezômetro inclinado para escoamento com sedimento em suspensão
$H_{total\ vertical\ com\ sedimento}$	Altura total vertical para escoamento com sedimento em suspensão
I	Fator equivalente a $\pm t \frac{\text{Desvio Padrão}}{\sqrt{n}}$
k	Constante de Von Kármán
k'	Coefficiente de Von Karman calculado com a equação do déficit da velocidade
K	Coefficiente de Consistência
K'	Fator da equação de cálculo da viscosidade relativa μ_r
L_{pf}	Leituras no paquímetro do fundo do canal
L_p	Leituras dos diferentes níveis de água
L_{pi}	Leituras no piezômetro inclinado
$L_{cc'}$	Leituras de alturas de água no eixo cc'
$L_{zz'}$	Leituras de alturas de água no eixo zz'
$L_{pi_dinamica\ com\ sedimento}$	Leitura no piezômetro inclinado para fluxo com sedimentos em suspensão
$L_{pi_dinamica}$	Leitura da altura total do escoamento no piezômetro inclinado
M	Momento gerado pelo rotor do viscosímetro
m	Exponente da equação do fluido pseudo-plástico
n	Número de dados da amostra
0_{pi}	Valor de zero (fundo do canal) no piezômetro inclinado
Pi	Porcentagem de peso do grupo de partícula i
Q	Vazão no canal
R^2	Coefficiente do ajuste linear
Ri	Número de Richardson
R_h	Raio hidráulico

Re_m	Número de Reynolds
S	Declividade
s	Razão entre b'/a'
T	Temperatura [°C]
t	Fator da tabela de Student
Tr	Terra roxa
u	Velocidade em uma profundidade do escoamento
u^*	Velocidade cisalhante
u_{max}	Velocidade na superfície do escoamento
u'	Flutuação de velocidade na direção ao fluxo
u'_{max}	O maior valor de velocidade medido dentro do perfil de velocidade numa altura $y'_{max} < h$
$\overline{u'v'}$	Tensão de Reynolds
U'	Velocidade obtida pela integração do perfil de velocidades
U	Velocidade média do escoamento obtido pelo método volumétrico
V	Vertissolo
v'	Flutuação de velocidade na direção perpendicular ao fluxo
W	Função de onda
w	Velocidade de queda
x	Altura estática do escoamento com sedimentos em suspensão
x_s	Atura estática equivalente do escoamento com sedimentos em suspensão
y	Altura referente ao fundo do canal
Z	Número de Rouse

Símbolos Gregos

α	Constante
β	Raio entre os $\varepsilon_y/\varepsilon_m$
γ_s	Peso específico do sedimento
γ_f	Peso específico do fluido
δ	Espessura da camada limite
δ'	Espessura da sub-camada viscosa

Δ	Massa específica da partícula submersa $(\rho_s - \rho)/\rho$
Δ'	Massa específica da partícula submersa em um fluido de mistura $(\rho_s - \rho_m)/\rho_m$
ε_y	Coefficiente de mistura turbulenta para sedimento
ε_m	Coefficiente de troca de momentum de Boussinesq
η	Coefficiente de rigidez ou viscosidade plástica
η_f	Película de água que envolve as partículas do sedimento
μ	Viscosidade dinâmica
μ_o	Viscosidade aparente para fluidos pseudo-plásticos
μ_r	Viscosidade relativa
ν	Viscosidade cinemática
ν_m	Viscosidade cinemática do fluido de mistura
ϕ	Concentração volumétrica
ρ	Massa específica
ρ_m	Massa específica do fluido de mistura
ρ_δ	Massa específica no ponto $y=\delta$
ρ_o	Massa específica no ponto $y=0$
ρ_s	Massa específica do sedimento
Π	Parâmetro de Coles
Ω	Velocidade angular do cilindro interno do viscosímetro
τ	Tensão cisalhante
τ_o	Tensão cisalhante junto à parede
τ_b	Tensão de escoamento
τ_a'	Tensão cisalhante na parede do cilindro interno
τ_w	Tensão de escoamento segundo Wang et al (1994)
$\tau_{\text{médio_calculado}}$	Tensão cisalhante média calculada

1. Introdução

O transporte de sedimentos afeta a qualidade da água, gerando prejuízos à saúde humana. O sedimento não só é o maior poluente da água, mas também serve como o maior agente de absorção, transporte e de armazenamento de outras formas de poluição. O transporte de sedimentos ocasiona sérios problemas no aproveitamento do recurso hídrico na aplicação de atividades do desenvolvimento econômico. Diversas indústrias não toleram altas quantidades de sedimentos, pois o processo produtivo é comprometido. Outro problema sério é o assoreamento de reservatórios, representando na diminuição da vida útil dos mesmos.

Em um canal aluvial com fluxo de sedimentos em suspensão, a exata informação do perfil de velocidade é importante não só para o conhecimento da interação fluido-partícula, mas também para o cálculo da resistência da superfície ao fluxo, fator importante na estimativa da taxa de transporte de sedimentos.

Através das pesquisas têm-se observado no transcurso das últimas décadas, que os escoamentos com baixas concentrações de sedimentos grossos em suspensão (1 a 2% de concentração volumétrica) sofrem mudanças no perfil de velocidade (Kereselidze e Kutavaia, 1995), independente do tipo de equação empregada para descrever o perfil: tanto a equação da “lei da parede” aplicada nos estudos iniciais (Vanoni, 1946; Einstein e Chien, 1955 e Elata e Ippen, 1961), quanto atualmente com a aplicação a equação do “déficit da velocidade” (Coleman 1981 e 1986; Kirkgöz 1989). Observou-se, por outro lado, que as concentrações não tinham efeitos sobre as propriedades físicas do fluido de mistura, expressas através das propriedades reológicas, especificamente na viscosidade do fluido, permitindo uma análise reológica no contexto de um fluxo bifásico e dentro de um comportamento newtoniano.

Recentemente as pesquisas têm prestado atenção aos efeitos do sedimento fino em suspensão sobre o perfil de velocidade, onde a diferença dos sedimento grosso em suspensão e as altas concentrações de material fino (de 5 % a 60% de concentração volumétrica, Julien 1995) têm gerado mudanças nas propriedades físicas do fluido de mistura. Neste caso, a análise das propriedades reológicas concentra-se na área de fluxo pseudo-monofásico (Wang et al. 1994), chegando, em alguns casos, sair do âmbito de fluido newtoniano para o de não newtoniano, apresentando mudanças até no regime do escoamento (Wang e Plate, 1996).

2. Justificativas, Objetivos e Hipóteses

2.1. Justificativas

Nos estudos ou projetos envolvendo a utilização dos recursos hídricos, ou outros elementos que constituem o meio ambiente, uma crescente preocupação é a procura de critérios e o desenvolvimento de tecnologias, que permitam avaliar o impacto ambiental decorrente das atividades humanas. Com referência ao uso do solo, umas das formas de avaliação de seu impacto ambiental é mediante a análise do sedimento produzido pela bacia hidrográfica ou pela região em estudo, seja de forma quantitativa ou qualitativa, a fim de obter indicadores ambientais que permitam estabelecer o grau de degradação do solo.

Uma das principais formas de geração de sedimentos nas bacias hidrográficas é a erosão hídrica. A precipitação que atinge o solo gera sua desagregação, cuja intensidade dependerá do tipo de solo e de seu uso. O escoamento superficial originado pela chuva, além de ser um agente que causa a erosão é também um meio de transporte do sedimento já desagregado. Essa quantidade de sedimentos que deixa a bacia hidrográfica causa, muitas vezes, queda na produtividade agrícola do solo e gera externalidades ambientais como o assoreamento de reservatórios e canais de irrigação e a contaminação de rios devido ao transporte dos poluentes empregados na garantia da produtividade das lavouras.

O Instituto de Pesquisas Hidráulicas, dentro da área de Erosão e Sedimentação, vem desenvolvendo uma linha de pesquisa referente ao estudo das condições hidráulicas do escoamento que acompanha a erosão hídrica dos solos que compõem as vertentes das bacias hidrográficas do Estado do Rio Grande do Sul.

A procura do entendimento do processo de erosão hídrica das vertentes, especificamente em sulcos e entre sulcos, tem motivado trabalhos de pesquisa básica como os de Merten (2000) analisando a capacidade de transporte dos sedimentos e sua interação com a taxa de desagregação do escoamento em sulcos. Estudos sobre a caracterização morfológica e hidráulica da erosão em parcelas submetidas à ação de chuva e fluxo-extra estão sendo desenvolvidos; bem como análises do escoamento em sulcos e caracterização da capacidade de transporte de sedimentos oriundos de diferentes solos do Rio Grande do Sul.

Estando estes trabalhos centralizados na caracterização hidráulica dos fluxos que ocorrem sobre diferentes tipos de solos e sendo esses solos caracterizados por diferentes composições granulométricas e físico-químicas, torna-se necessário, para complementar estes trabalhos, desenvolver uma metodologia que permita avaliar as mudanças das características dinâmicas

do escoamento e sua interação com a superfície do fundo, isto é, requer-se um estudo do perfil de velocidade para o cálculo da resistência da superfície ao fluxo, fator importante na estimativa da taxa de transporte de sedimentos.

O escoamento superficial em vertentes é constituído por um escoamento de pouca espessura. Abrahams e Ly (1998) realizaram um estudo do perfil de velocidade nestas condições, com alturas de escoamento variando de 0,4cm a 0,8cm; agindo sobre sedimento grosso (diâmetro médio de 0,74 mm), pois havia limitações do equipamento utilizado (anemômetro a filme quente) na medição de velocidades em um meio com sedimento fino.

No presente trabalho pretende-se desenvolver e adaptar equipamentos e metodologias para o estudo dos perfis de velocidades em escoamentos de pouca espessura, procurando-se, na medida do possível, reproduzir as mesmas condições naturais de fluxo superficial observadas nas vertentes das áreas de origem dos solos em estudo.

2.2. Hipóteses e Objetivos

2.2.1. Hipóteses

As hipóteses a serem comprovadas são as seguintes:

1. Os fluidos de mistura água-sedimento sofrem mudanças nas propriedades reológicas em função da concentração e do tipo de composição mineral do sedimento fino. Espera-se que esta mudança afete os padrões de escoamento.
2. A velocidade de queda dos sedimentos grossos em um fluido de mistura água-sedimento fino serão afetadas pela concentração e composição mineralógica dos sedimentos finos em suspensão.
3. Os escoamentos com fluidos de mistura água-sedimento sofreriam modificações em seus padrões de escoamento devido à concentração, à composição mineralógica e à granulometria dos sedimento em suspensão.

2.2.2. Objetivos

Os objetivos desse estudo podem ser sub-divididos em gerais e específicos, uma vez que para a análise do comportamento do escoamento na presença de diferentes teores de sedimentos, não somente a mistura água-sedimento deve ser caracterizada, mas também os

padrões de seu escoamento, gerando uma série de ações específicas.

- Gerais

O objetivo geral deste trabalho é a análise do efeito da presença de sedimentos em suspensão sobre as características dinâmicas do escoamento (perfil de velocidades) utilizando material fino oriundo de três tipos de solos característicos do sul do Brasil.

- Específicos

Como objetivos específicos, que gerarão um conjunto de conhecimentos que permitirão atingir o objetivo geral, pode-se citar:

1. O levantamento das propriedades do sedimento fino, tais como massa específica e curva granulométrica;
2. A determinação das propriedades reológicas do fluido composto pela mistura dos sedimentos finos e água;
3. O desenvolvimento de metodologia e aparato experimental para avaliação da velocidade de queda de sedimentos grossos dentro de um fluido em repouso com hiperconcentração de sedimentos finos e apresentando comportamento não newtoniano;
4. A avaliação dos perfis de velocidade do escoamento com sedimento em suspensão;
5. Desenvolvimento de metodologia e aparato experimental para o estudo do perfil de concentração;

3. Considerações Teóricas

3.1. Perfil de Velocidade Turbulento em Canal Aberto

O fluxo turbulento totalmente desenvolvido dentro de um canal aberto consiste de uma região interna (“inner”) ou região da parede, ($\frac{y}{h} < 0,2$) e outra região externa (“outer”) ($0,2 < \frac{y}{h} < 1$), sendo y a distância referente ao fundo do canal e h a altura total do escoamento no canal. Na região interna, as velocidades médias pontuais são geralmente controladas pela tensão cisalhante junto à parede, rugosidade da parede, distância à parede, massa específica e viscosidade do fluido. Na região externa, estas são controladas pelos efeitos da superfície livre.

A região interna consiste de duas partes distintas denominadas: sub-camada viscosa e camada totalmente turbulenta. Experimentos realizados por Klebanoff (1954) mostraram que a tensão cisalhante total em pontos perto da parede é constante e igual à da tensão cisalhante junto à parede (τ_0). A integração da lei de Newton de viscosidade ($\tau = \mu \frac{du}{dz}$ com $\tau = \tau_0$), indica que a distribuição da velocidade na sub-camada viscosa é

$$\frac{u}{u^*} = \frac{u^* y}{\nu} \quad (3.1)$$

onde $u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ é a velocidade cisalhante; ρ é a massa específica do fluido; ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Na parte da região interna com turbulência desenvolvida, a equação de distribuição logarítmica de Von Karman-Prandtl é universalmente reconhecida para expressar o perfil de velocidades (lei da parede). A equação tem a seguinte forma:

$$\frac{u}{u^*} = A \ln \frac{u^* y}{\nu} + B \quad (3.2)$$

no qual $A = \frac{1}{k}$, k é a constante universal de Von Kármán, a qual é independente da natureza da parede (lisa ou rugosa) e $B =$ constante dependente da natureza da superfície da parede (Schlichting, 1968). As constantes obtidas por Nikuradse (1932) para tubulações hidraulicamente lisas foram $A=2,5$ e $B=5,5$. Outros autores tem verificado experimentalmente outros valores de A e B , que são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Valores experimentais das constantes A e B.

Autor	A	k	B
Klebanoff (1954) apud Kirkgöz (1989)	2,44	0,409	4,90
Townsend (1956) apud Kirkgöz (1989)	2,44	0,409	7,00
Huffman e Bradshaw (1972)	2,44	0,409	5,00
Steffler et al (1985)	2,50	0,400	5,00
Nezu e Rodi (1986)	2,43	0,411	5,29
Kirkgöz (1989)	2,44	0,409	5,50

Uma região intermediária entre a camada sub-viscosa e a totalmente turbulenta, $5 < \frac{u^* y}{\nu} < 30$, é conhecida como camada tampão (“buffer layer”). Van Driest (1956) propôs um modelo de cálculo para esta região de interface. As equações 3.1 e 3.2, que descrevem as sub-regiões da região interna, fazem parte da chamada “Lei da Parede”.

Dentro da região externa, dados experimentais mostraram não se ajustam ao perfil de velocidades calculado a partir da equação 3.2. Assim, foi proposto o emprego de uma função de onda, de forma similar à formulação utilizada para descrever o perfil de velocidades na zona interna:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{u^* y}{\nu} + B + W\left(\frac{y}{h}\right) \quad (3.3)$$

onde W é uma função de onda. Coles (1956) sugere uma função de onda puramente empírica para a equação 3.3

$$W = \frac{2\Pi}{k} \text{sen}^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) \quad (3.4)$$

onde Π é o parâmetro de Coles. Então, das equações (3.3) e (3.4) tem-se

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{u^* y}{\nu} + B + \frac{2\Pi}{k} \text{sen}^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) \quad (3.5)$$

Na expressão 3.5, os valores de k e B deixam de ser constantes, surgindo a necessidade de ajuste, juntamente com o do parâmetro de Coles.

A função pode ser rescrita tomando a diferença entre dois valores pontuais da

velocidade: um na superfície, onde u é um valor máximo (u_{max}) para $y=h$ e o outro em um ponto qualquer da região externa, obtendo a expressão 3.6, conhecida como lei dos déficits de velocidade.

$$\frac{u_{max} - u}{u^*} = -\frac{1}{k} \ln \frac{y}{h} + \frac{2\Pi}{k} \cos^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) \quad (3.6)$$

Uma variante da equação 3.6 foi proposta por Coleman (1981), considerando que esta função só é válida dentro da espessura da camada limite do canal aberto, na qual a velocidade máxima acontece quando $y=\delta$, onde δ é a espessura da camada limite. Então temos que a nova equação é:

$$\frac{u_{max} - u}{u^*} = -\frac{1}{k} \ln \frac{y}{\delta} + \frac{2\Pi}{k} \cos^2\left(\frac{\pi y}{2\delta}\right) \quad (3.7)$$

3.2. Efeito da Presença de Sedimentos sobre o Perfil de Velocidades

Os primeiros estudos experimentais dos efeitos do sedimento em suspensão sobre o perfil da velocidade foram realizados por Vanoni (1946), Barton e Lin (1955) apud Garde e Ranga Raju (1978), Einstein e Chien (1955), Laursen (1958) apud Garde e Ranga Raju (1978) e Elata e Ippen (1961). Os resultados destes pesquisadores sugeriram que o coeficiente k de Von Karman diminui com o incremento da concentração do sedimento. Estes resultados aparecem em muitos livros clássicos de transporte de sedimento tais como Graf (1971), Yalin (1972), Raudkivi (1967).

Coleman (1981) discute a conclusão acima argumentando que os cálculos de k foram feitos a partir da equação 3.2 (lei da parede). Novos cálculos de k , empregando a equação 3.7 e tomando como base os dados dos trabalhos de Vanoni (1946), Einstein e Chien (1955), Elata e Ippen (1961) e do próprio Coleman (1981), mostraram que k é independente da concentração, permanecendo quase constante com o incremento desta. Já o valor do parâmetro de Coles (Π), teve uma variação complexa com o incremento da concentração, não se conseguindo identificar nenhuma relação direta (figura 3.1).

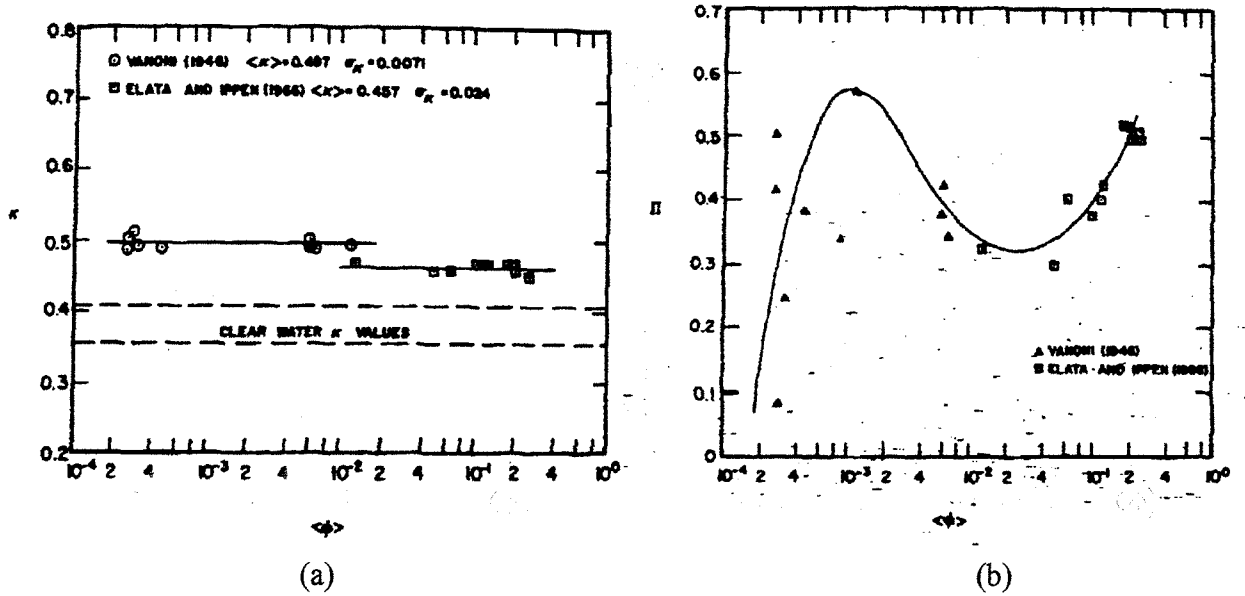


Figura 3.1. Resultados de Coleman, (a) k versus ϕ e (b) Π versus ϕ .

Onde ϕ é a concentração volumétrica.

Para poder avaliar se realmente a concentração estava modificando as constantes k e Π , Coleman (1986) emprega como parâmetro de avaliação o número de Richardson, sugerido por Monin e Yaglom (1971), para caracterizar o perfil da concentração dentro da camada limite:

$$Ri = \frac{g\delta(\rho_\delta - \rho_o)}{\rho_m u'^2} \quad (3.8)$$

onde ρ_δ , ρ_o e ρ_m são calculados através das seguintes expressões :

$$\rho_\delta = \rho_s C_{v_\delta} + \rho(1 - C_{v_\delta}) \quad (3.9)$$

ρ_δ e C_{v_δ} são a massa específica e a concentração volumétrica no ponto $y = \delta$

$$\rho_o = \rho_s C_{v_o} + \rho(1 - C_{v_o}) \quad (3.10)$$

ρ_o e C_{v_o} são a massa específica e a concentração volumétrica no ponto $y = 0$

$$\rho_m = \rho_s C_v + \rho(1 - C_v) \quad (3.11)$$

ρ_m e C_v são a massa específica e a concentração volumétrica médias do escoamento,

($C_v = \frac{\text{Volume solido}}{\text{Volume Total}}$) e ρ é a massa específica do fluido, neste caso água limpa.

Os resultados de Coleman (1986) mostraram que k permanece constante com a variação do número de Richardson (Ri), o que não ocorre com Π , que variou de 0,2 até 0,9.

Devemos objetivar que estes experimentos foram feitos com material grosso em água limpa e concentrações baixas, não superiores a $C_v = 1\%$ ou 2% .

Um estudo muito interessante foi realizado por Kereselidze e Kutavaia (1995) com carvão mineral e concentrações volumétricas variando de 0,77 a 33 %. Os resultados obtidos mostraram que os valores de k e Π , decresceram e aumentaram, respectivamente, com o aumento do Número de Richardson.

Os estudos realizados para a determinação do efeito do material fino e grosso no perfil de velocidades são poucos a nível de literatura ocidental, mas, de certo modo, abundantes na literatura chinesa, onde a natureza dos seus solos e as práticas de uso nos mesmos, originaram sérios problemas de assoreamento em canais de irrigação, reservatórios e problemas de fluxo de detritos ("Debris Flow"). Pouco deste valioso material se encontra publicado em inglês, restringindo sua circulação na China.

Uns dos primeiros trabalhos que se tem menção foi de Kalinske e Hsia (1945) apud Coleman (1981), para sedimento com $d=0,01\text{mm}$ e Gust (1976) apud Coleman (1981), experiência realizada em argilas em água de mar. Em ambos trabalhos, o conceito da época de que k decresce com o aumento da concentração, não foi confirmado.

Resultados experimentais em um canal realizados por Yang e Zhao (1983) apud Wan e Wang (1994), mostraram que o perfil da distribuição de velocidades ainda é logarítmico mas que o coeficiente k apresenta valores menores aos encontrados na água limpa, não sendo observada uma relação direta entre a concentração volumétrica e o coeficiente k .

Perfis de velocidades medidos em campo no rio Wundin (Qian e Wan, 1983, apud Wan e Wang, 1994), de maneira similar aos dados de laboratório, foram afetados pela concentração de sedimentos, observando-se na maioria dos casos valores de k menores na água limpa; e não se conseguindo estabelecer uma relação direta de k com a concentração. Em ambos os exemplos, a base para os cálculos foi a equação (3.2).

Wang e Plate (1994) avaliando o perfil de velocidades em fluidos não newtonianos, observam que k e Π não são constantes, mas dependem das propriedades do fluido e do Número de Reynolds. Para experiências com escoamentos com concentrações volumétricas entre 0 e 10 %, o perfil de velocidade seguiu a equação 3.6, com valores de k variando de 0,33 a 0,40 e valores de Π entre $-0,06$ e $-0,2$ para o regime turbulento. Em concentrações volumétricas altas, o escoamento encontra-se em regime de transição e o ajuste da equação 3.6 se faz mas difícil, observando que o gradiente de velocidades na região externa é quase zero e que este assume um valor alto na região interna, com os valores de k e Π variando de $\langle 0,15$ a $0,28 \rangle$ e $\langle -0,4$ a $-0,83 \rangle$. Também foi constatado que os coeficientes k e Π sofrem um incremento com o aumento do número de Reynolds (Re), sendo este número avaliado por:

$$Re = 4 \frac{UR_h}{\nu} \quad (3.12)$$

onde R_h é o raio hidráulico, U é a velocidade média do escoamento.

Para ter uma idéia do feito da mistura de dois sedimentos (grosso e fino), Wang e Larsen (1994) calcularam os valores de k utilizando a equação 3.2, para o escoamento somente com material fino, e no outro, com material fino e material grosso conjuntamente, observando uma queda no valor de k de um caso para outro.

3.3. Propriedades Físicas da Mistura Água-Sedimento

Da revisão bibliográfica, pode-se observar a importância do conhecimento do valor exato das variáveis que expressam as propriedades do fluido e do sedimento, além daquelas que expressam a interação fluido-sedimento dentro do escoamento na formulação do perfil de velocidades que se desenvolve no escoamento. São estas variáveis (Tabela 3.2) que dão um sentido físico às equações empregadas na determinação do efeito do sedimento (fino e grosso) sobre o perfil da velocidade.

Tabela 3.2. Variáveis importantes no cálculo do perfil da velocidade

Variável	Símbolo	Importância
Massa específica do fluido	ρ	No cálculo da concentração volumétrica e na determinação da massa específica de mistura de água com sedimento
Massa específica do sedimento	ρ_s	No cálculo da Concentração volumétrica e no cálculo da massa específica de mistura
Massa específica de mistura da água com sedimento	ρ_m	No cálculo do perfil de velocidade experimental (este tópico será descrito no capítulo 4) e no cálculo do Número de Richardson
Viscosidade cinemática	ν	No cálculo do Reynolds e no cálculo do perfil de velocidade
Velocidade de queda de material grosso em um fluido em repouso com sedimentos em suspensão	w	No cálculo do Número de Rouse para a determinação da condição de transporte do sedimento: arraste ou suspensão
Velocidade de Cisalhamento	u^*	Para o cálculo do perfil de velocidades, no cálculo dos Números de Rouse e Richardson

Embora, não seja uma variável do escoamento, a determinação do perfil de concentração de sedimentos torna-se importante para o cálculo do Número de Richardson, bem como para determinar a porcentagem de material que se encontra em suspensão ou está sendo

transportado por arraste.

A seguir, serão descritas, as variáveis consideradas na Tabela 3.2, bem como a forma de avaliar o perfil de concentração.

3.3.1. Massas específicas

A massa específica do fluido refere-se à quantidade de matéria presente em uma unidade de volume (M/L^3). No caso da água, é usual assumir a massa específica de $1000\text{kg}/\text{m}^3$, entretanto ela varia com a temperatura, devendo ser corrigida.

Assim como da água, a massa específica do sedimento refere-se à quantidade de matéria presente em uma unidade volume (M/L^3). No caso de sedimento, onde se observe uma textura variada, é necessária, a determinação das curvas granulométricas e das massas específicas das classes presentes no sedimento como um todo.

Devido ao fato de que a água é um excelente solvente, sua massa específica pode ser incrementada com a presença de sólidos nela diluídos. Tal é o caso da presença de sólidos minerais que permanecem em suspensão por longos períodos, incrementando a massa específica de forma quase permanente. A fórmula mais utilizada para a estimativa da massa específica de uma mistura é:

$$\rho_m = \rho_s C_v + \rho(1 - C_v) \quad (3.13)$$

onde as variáveis ρ_m , ρ_s e C_v já foram definidas no item 3.2.

3.3.2. Viscosidade cinemática

Antes de se definir a viscosidade cinemática de um fluido, é necessário abordar alguns conceitos ligados à Reologia e às propriedades reológicas dos fluidos, para que fique claro que a viscosidade cinemática é mais um parâmetro que expressa o comportamento e as mudanças das propriedades reológica do fluido formado pela mistura água com sedimento fino.

Em primeiro lugar, entenda-se que a Reologia é a ciência que estuda as propriedades de uma matéria líquida ou sólida que se forma e flui devido à ação de uma força, gerando um movimento relativo entre os diferentes elementos do fluido (Barnes et al, 1989).

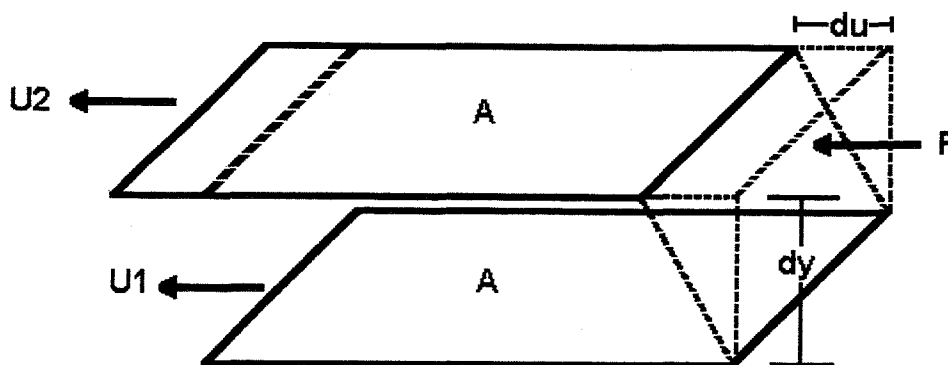


Figura 3.2. Fluxo de fluido, formação do gradiente de velocidade devido à ação da força F .

Como se pode observar na Figura 3.2, duas camadas de fluido de área A , afastadas entre si, sofrem a ação de uma força F aplicada sobre a camada superior de fluido, que produz deslocamento e cria um gradiente de velocidades. A reologia define $F/A = \tau$ denominada como tensão cisalhante ou tangencial (“shear stress”) como sendo proporcional ao gradiente de velocidades ou taxa de deformação angular (“shear rate”). Esta relação chama-se equação reológica e a sua expressão gráfica é chamada de reograma.

Isaac Newton postulou que a tensão cisalhante ou tangencial é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade ou taxa de deformação $\frac{du}{dy}$, estabelecendo a equação reológica :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.14)$$

onde dy é o afastamento entre as camadas do fluido; du é a variação da velocidade entre as camadas, a constante μ é a viscosidade dinâmica do fluido que expressa o atrito interno intermolecular, gerado pela atração molecular, que causa resistência ao fluxo, sendo o fluido com este tipo de comportamento reológico denominado de fluido Newtoniano (ver Figura 3.3, reograma A).

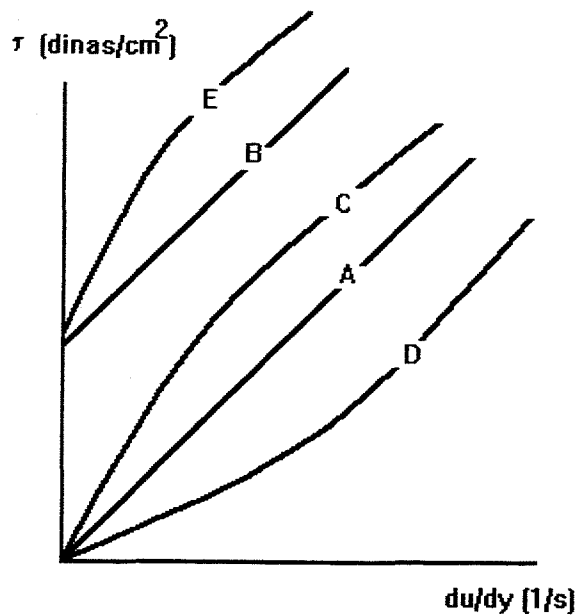


Figura 3.3. Reogramas de diferentes tipos de fluidos: newtoniano (A), pseudo-plástico (C), dilatante (D), plástico ou de Bingham (B) e pseudo-plástico com tensão de escoamento (E).

Estudos posteriores demonstraram que nem todo fluido segue este comportamento linear, sendo então denominados de fluidos não Newtonianos. Em geral, os fluidos não Newtonianos podem ser classificados como:

a) Fluidos pseudo-plásticos, onde a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação é não linear (ver figura 3.3; reograma C), tendo como modelo,

$$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^m \quad (3.15)$$

definindo-se como viscosidade aparente,

$$\mu_o = \frac{\tau}{\left(\frac{du}{dy} \right)} = K \left(\frac{du}{dy} \right)^{m-1} \quad (3.16)$$

onde K é coeficiente de consistência, de tal modo que quanto maior o seu valor, tanto mais viscoso é o fluido e o valor de $m < 1$. Os valores de K e m dependem da natureza do fluido;

b) Fluidos dilatantes, onde a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação, podem seguir um modelo análogo ao dos pseudo-plásticos

$$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^m \quad (3.17)$$

mas com valor de $m > 1$ (Figura 3.3; reograma D);

c) Fluidos plásticos, que podem se comportar como um sólido sob determinadas condições, ou seja, quando a interação molecular é de tal magnitude que uma força aplicada sobre o fluido não origina fluxo entre as camadas, causando apenas uma deformação entre elas. Uma vez que a força tenha atingido um determinado valor (tensão de escoamento τ_b), inicia-se o fluxo. A relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação, após ser atingida a tensão de escoamento, é linear (ver Figura 3.3; reograma B). Esta relação pode-se ser expressa por:

$$\tau = \tau_b + \eta \frac{du}{dy}, \quad (3.18)$$

conhecida como a equação de Bingham. O termo fluido “plástico de Bingham” também é aplicado para definir os fluidos que se adequam a esta equação, onde o termo η é o coeficiente de rigidez ou viscosidade plástica.

Em alguns casos, os fluidos podem apresentar tensão de escoamento e ter um comportamento não linear à partir deste valor. Um exemplo, é o caso do reograma E na Figura 3.3. Este tipo de fluido é denominado de fluido pseudo plástico com tensão de escoamento.

A Tabela 3.3 apresenta um resumo dos diferentes tipos de fluido de acordo com a suas relações reológicas.

Tabela 3.3. Equações reológicas.

Tipo de fluido	Equação reológica
Fluido Newtoniano	$\tau = \mu \frac{du}{dy}$
Fluido plástico de Bingham	$\tau = \tau_b + \eta \frac{du}{dy}$
Fluido pseudo-plástico $m < 1$ Fluido dilatante $m > 1$	$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^m$
Fluido pseudo-plástico com tensão de escoamento	$\tau = \tau_b + K \left(\frac{du}{dy} \right)^m$

Em alguns fluidos sob condições de taxa de deformação constante, ocorrem mudanças da viscosidade aparente com o passar do tempo, produzindo uma modificação do reograma, isto é, uma modificação da relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação. Estes

tipos de fenômenos são chamados de Tixotropia e Reopexia. A Tixotropia consiste em um aumento da tensão de cisalhamento quando a taxa de deformação $\left(\frac{du}{dy}\right)$ permanece constante em um intervalo de tempo (figura 3.4 detalhe circunferência T) para uma melhor visualização deste fenômeno construiu-se uma curva que avalia a mudança da tensão cisalhante com o tempo de análise para a mesma taxa de deformação constante (figura 3.4 detalhe circunferência T').

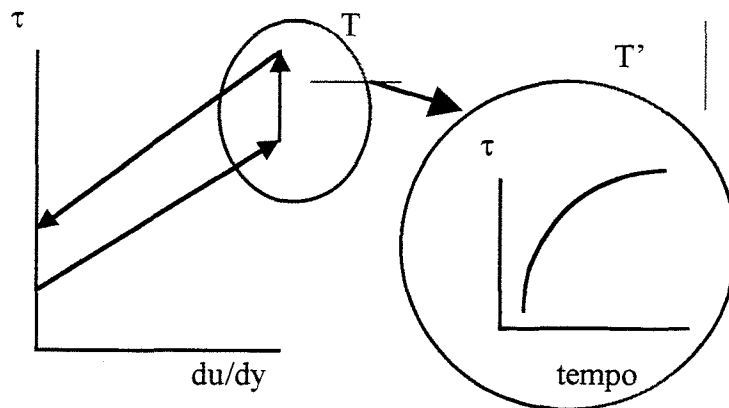


Figura 3.4. Tixotropia em fluidos de Bingham

O caso de Reopexia consiste em um efeito contrário à Tixotropia; neste caso acontece uma diminuição da tensão cisalhante para uma taxa de deformação angular constante aplicada em um tempo de análise determinado (Figura 3.5 detalhes R e R').

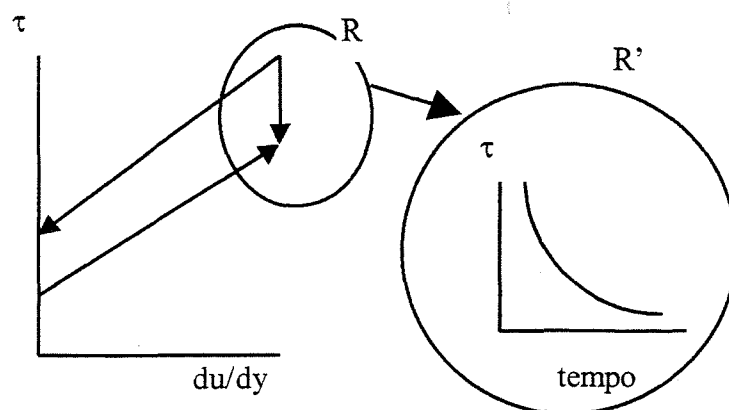


Figura 3.5. Reopexia em fluidos de Bingham

Um fluido com uma pequena concentração de sedimentos permanece como um fluido newtoniano; contudo, pode apresentar uma modificação no valor da viscosidade, a qual passa

a ser dependente da concentração do sedimento: o coeficiente de viscosidade dinâmica aumenta com o aumento da concentração. Einstein estabeleceu uma relação linear entre a viscosidade relativa (razão entre a viscosidade dinâmica da mistura água com sedimento e a viscosidade dinâmica para água limpa) e a concentração (equação 3.19). Esta supõe que as partículas do sedimento em suspensão encontram-se a uma determinada distância entre si que não permite que nenhuma delas tenha efeito sobre as vizinhas.

$$\mu_r = 1 + 2,5C_v \quad (3.19)$$

onde $\mu_r = \frac{\mu_{\text{com sedimentos}}}{\mu_{H_2O}}$

Tomando como base a equação 3.19, Chu (1980) apud Wan e Wang (1994) considera que existe uma película de água (η_f) envolvendo cada partícula e, incrementando a concentração efetiva, chega a uma nova equação corrigida:

$$\mu_r = 1 + 2,5K'C_v \quad (3.20)$$

O fator K' expressa a razão entre o volume das partículas com diâmetro d (esferas uniformes), somado à espessura da película de água η_f , sobre o volume das partículas.

$$K' = \left[\frac{(d + 2\eta_f)}{d} \right]^3 = \left[1 + \frac{2\eta_f}{d} \right]^3 = 1 + 3\frac{2\eta_f}{d} + 3\left(\frac{2\eta_f}{d} \right)^2 + \left(\frac{2\eta_f}{d} \right)^3 \quad (3.21.a)$$

Desprezando os valores de alta ordem de η_f/d da equação 3.21.a, obtém-se:

$$K' = 1 + \frac{6\eta_f}{d} \quad (3.21.b)$$

Considerando que os sedimentos na natureza se dividem em classes, a equação que define a viscosidade da mistura pode ser escrita como:

$$\mu_r = \left\{ 1 - 1.4 \left[1 + 6 \sum \left(\frac{\eta_f}{d_i} \right) P_i \right] C_v \right\}^{-2.5} \quad (3.22)$$

onde P_i e d_i são as porcentagens de peso e diâmetro médio do grupo de partícula i , os valores da película η_f pode ser considerado de 1 μm para o sedimento e 0,13 μm para as esferas de vidro.

A complexidade do comportamento reológico de material fino em suspensão é devido às partículas de argila, que são formadas na maioria das vezes por uma estrutura de empilhamento de camadas (1:1 para caulinitas e 2:1 para esmectitas), originando numa mesma estrutura a formação por duas faces com camadas duplas elétricas de diferente signo e magnitude. Consequentemente, há três formas básicas de associações ou “ligações” das partículas: a) associação entre as duas partículas de forma paralela tipo empilhamento, face com face “face-to-face”; b) associação entre os extremos ou arestas de duas partículas, aresta com aresta “edge-to-edge”, e c) associação entre extremo ou aresta de uma partícula com a face de outra, face com aresta “face-edge”. O maior ou menor efeito destas “ligações” variará com os seguintes fatores: a) a concentração das partículas; b) a concentração de eletrólitos em suspensão; c) a composição dos íons trocáveis, e d) pela composição mineralógica das partículas.

Por exemplo, quando a concentração de sedimentos excede um certo valor, em especial para sedimentos contendo partículas finas tipo argila, a mistura deixa de se comportar como um fluido newtoniano. Esta concentração crítica varia com a distribuição granulométrica e a composição mineral do sedimento, bem como com a qualidade da água (variação de pH). O estudo das propriedades reológicas de diferentes tipos de argila (caolinita e montmorilonita) realizado por Karen (1988) determinou que soluções de caolinita saturadas com sódio (Na) ou cálcio (Ca), com características de fluido newtoniano e submetidas a diferentes pH, apresentaram uma diminuição do coeficiente da viscosidade com o aumento do pH em relação a um fluido com comportamento Newtoniano. No mesmo estudo observou-se o efeito da mistura de montmorilonita com caolinita (ambas saturadas com Ca ou Na): um aumento da quantidade de montmorilonita sobre uma concentração de caolinita, determinou uma variação do comportamento de newtoniano (caolinita saturada sem presença de montmorilonita) para fluido pseudo-plástico (com o aumento da concentração da montmorilonita).

Um estudo similar feito por Wang *et al* (1994) analisou o efeito da capacidade de troca de cátions (CTC), concluindo que uma argila com diferentes cátions tem diferentes propriedades reológicas. As suspensões com cátions bivalentes apresentaram maiores tensões de escoamento e viscosidades plásticas superiores às dos cátions monovalentes. A suspensão de materiais finos apresentou tensão de escoamento, no entanto, a suspensão de materiais

grossos não apresentou essa propriedade. Outra característica importante foi que as propriedades reológicas sofrem maior influência da composição mineralógica do sedimento do que do tamanho do grão em suspensão. Outras propriedades reológicas foram encontradas tais como a tixotropia, fenômeno no qual a tensão de escoamento diminui após o fluido ser submetido a uma agitação mecânica. O efeito contrário, como a reopexia ou anti-tixotropia, também foi detectado em outras amostras de composição mineral diferente daquelas que apresentaram tixotropia.

Em fluxos com altas concentrações, uma estrutura de floculação é formada devido à ação físico química da superfície das partículas finas. Esta estrutura de floculação determina o aparecimento da tensão de escoamento (quando a interação molecular é de tal magnitude que uma força aplicada sobre o fluido não origina fluxo entre as camadas, causando apenas uma deformação entre elas. Uma vez que a força tenha atingido um determinado valor, isto é uma dada tensão chamada de escoamento τ_b , inicia-se o fluxo), sendo constituída por numerosas “ligações”. As ligações que não estão conectadas são chamadas de ligações livres. A formação de um grau de estrutura de floculação, acontecerá quando uma certa quantidade das ligações livres se conectarem, sendo que a conexão de todas as ligações livres é chamada de ligação estruturada. A maioria das medições reológicas realizadas sobre fluidos hiperconcentrados naturais conduzem a um comportamento similar ao do fluido Bingham ou plástico. Major e Pierson (1992) chegaram a esta conclusão estudando as propriedades reológicas de depósitos de material fino dos fluxos de detrito (“debris flow”) da região do rio “North Fork Toutle” na América do Norte. Os depósitos de fluxos de lama naturais da estação de primavera nas montanhas rochosas do Colorado, analisadas por O’Brien e Julien (1988) apresentaram um comportamento reológico do tipo Bingham. Os dados levantados por Wan e Wang (1994) demonstraram que este modelo é capaz de descrever as propriedades do fluido das enxurradas formadas nos caminhos preferenciais das vertentes e na maioria dos rios da China. Também no fluxo de detritos ou avalanche (“debris flow”) nos Alpes franceses, no qual a matriz que transporta os sedimentos grossos é composta por sedimentos finos e água, o comportamento é de um fluido de Bingham. Com os exemplos mencionados acima, conclui-se que é importante o estudo de fluidos de Bingham, para o melhor entendimento da maioria dos fluxos hiperconcentrados encontrados na natureza.

3.3.3. Velocidade de queda de partículas grossas em um fluido com sedimentos em suspensão

A velocidade de queda de sedimentos dentro da água vem sendo estudada desde Stokes (1851) ou, mais recentemente, por Van Rijn (1989) apud Nian-Sheng Cheng (1997). Como exemplo das diferentes expressões para a velocidade de queda têm-se as equações 3.23, 3.23b 3.23c, geradas por Van Rijn (1989) :

$$w = \frac{1}{18} \frac{\Delta g d^2}{\nu} \quad \text{para } d < 0,01 \text{ cm} \quad (3.23a)$$

$$w = 1,1 \sqrt{\Delta g d} \quad \text{para } d > 0,1 \text{ cm} \quad (3.23b)$$

$$w = 10 \frac{\nu}{d} (\sqrt{1 + 0,01 d^3} - 1) \quad \text{para } d = 0,01 \text{ a } 0,1 \text{ cm} \quad (3.23c)$$

onde w é a velocidade de queda em cm/s, Δ é a massa específica da partícula submersa dada pela expressão $(\rho_s - \rho)/\rho$, g é a gravidade em cm/s² e ν é a viscosidade cinemática em cm²/s.

Concharov (1992) apud Chen (1997) sugere as seguintes equações:

$$w = \frac{1}{24} \frac{\Delta g d^2}{\nu} \quad \text{para } d < 0,015 \text{ cm} \quad (3.24a)$$

$$w = 1,068 \sqrt{\Delta g d} \quad \text{para } d > 0,15 \text{ cm} \quad (3.24b)$$

$$w = 67,6 \Delta d + 0,52 \Delta \left(\frac{T}{26} - 1 \right) \quad \text{para } d = 0,015 \text{ a } 0,15 \text{ cm} \quad (3.24c)$$

onde T é a temperatura em °C, d e w são expressos em cm e cm/s, respectivamente.

Resulta interessante colocar também o modelo de Rubey:

$$w = F (dg\Delta)^{1/2} \quad (3.25.a)$$

$$F = \left(\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{gd^3\Delta} \right)^{1/2} - \left(\frac{36\nu^2}{gd^3\Delta} \right)^{1/2} \quad (3.25.b)$$

pois é um modelo adotado por Einstein em suas equações de arraste e transporte total e utilizada em vários outros modelos de transporte de sólidos.

Outra equação mais simples é a de Cheng (1997), empregada para o cálculo da velocidade de queda em água limpa :

$$w = \frac{v \left(\sqrt{25 + 1,2d_*^2} - 5 \right)^{1,5}}{d} \quad (3.26)$$

onde d_* é o diâmetro de partícula adimensionalizado, $d_* = \left(\frac{\Delta g}{v^2} \right)^{(1/3)} d$

Cheng (1997) também sugere a equação 3.27 para determinar o efeito da concentração sobre a velocidade de queda de partículas grossas. Na realidade, esta nova equação é uma modificação da equação anterior 3.26, considerando mudanças na viscosidade cinemática do fluido e na massa específica devido a concentração de material fino mas considerando ainda o fluido como newtoniano.

$$\frac{w_m}{w} = \frac{2 - 2C_v \left(\sqrt{25 + 1,2d_*'^2} - 5 \right)^{1,5}}{2 - 3C_v \left(\sqrt{25 + 1,2d_*^2} - 5 \right)} \quad (3.27)$$

Onde w_m é a velocidade de queda da partícula em um fluido com sedimento em suspensão, d'_* é o diâmetro de partícula adimensionalizado dentro do fluido com sedimento em suspensão, $d_*' = \left(\frac{\Delta' g}{v_m^2} \right)^{(1/3)} d$, v_m é a viscosidade cinemática do fluido de mistura e $\Delta' = (\rho_s - \rho_m) / \rho_m$.

No caso do fluido não newtoniano, os estudos realizados para a determinação das propriedades reológicas estabelecem que a tensão de escoamento é um parâmetro que tem sua origem na estrutura de floculação, isto é, na ação superficial físico-química das partículas finas. A existência dessas estruturas permitirá que partículas grossas possam ser mantidas em suspensão, diminuindo sua velocidade de queda em relação à velocidade de queda que apresentariam em meio de água limpa. A velocidade de queda de partículas grossas em um fluido de Bingham foi estudado por muitos pesquisadores, sendo que um dos primeiros foram Valentik e Whitmore (1965) apud Song e Chiew (1997).

As pesquisas realizadas por Chien e Wang (1983) apud Song e Chiew (1997) determinaram a existência de uma proporcionalidade entre o diâmetro d da partícula grossa em suspensão e a tensão de escoamento τ_b , como mostra a Equação 3.28.

$$\frac{6\tau_b}{d(\gamma_s - \gamma_f)} = \alpha \quad (3.28)$$

onde γ_s e γ_f são os pesos específicos das partículas grossas e do fluido de Bingham, respectivamente; τ_b é a tensão de escoamento; α é uma constante.

No estudo da determinação da velocidade de queda de partículas grossas em um fluxo hiperconcentrado em movimento realizado por Song e Chiew (1997), partículas grossas que eram mantidas em suspensão em um fluido de Bingham em repouso, foram introduzidas em um sistema fechado e recirculadas dentro do mesmo. A vazão era tal que permitia manter as partículas grossas em movimento e, logo repentinamente, uma válvula de controle era fechada detendo o fluido. Observou-se que nessa situação, o novo fluido estagnado apresentava, no fundo da tubulação, material depositado, isto é, tinha-se produzido uma diminuição da tensão de escoamento. A explicação deste fenômeno é a seguinte: em um fluido de Bingham em movimento, a geração de turbulência destrói parte da estrutura de floculação, resultando na diminuição da tensão de escoamento. Consequentemente, sedimentos que estavam em suspensão agora depositam-se no fundo.

3.3.4. Velocidade cisalhante

A velocidade cisalhante (u^*), que é usada na análise do perfil de velocidades, é a variável cujo cálculo está mais sujeito a erros, seja por métodos experimentais ou analíticos (Muste e Patel, 1997). Os métodos para o cálculo de u^* são quatro:

1. Supondo uma variação linear da tensão cisalhante total (τ), e que o valor de τ é igual à soma de duas tensões cisalhantes: uma viscosa ou molecular e a turbulenta, considerando que τ_0 é seu valor no fundo ($y=0$) e $\tau=0$ na superfície ($y=h$), tem-se:

$$\frac{\tau}{\rho} = -\overline{u'v'} + \nu \frac{\partial u}{\partial y} = u^{*2} \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (3.29)$$

Considerando uma parte da equação 3.28, tem-se

$$-\overline{u'v'} + \nu \frac{\partial u}{\partial y} = u^{*2} \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (3.30)$$

Quando os valores de profundidade (y) de análise da tensão cisalhante são maiores que a camada sub-camada viscosa δ' , e ela é maior que a rugosidade do fundo (fundo liso), a tensão de cisalhamento total é igual a tensão cisalhante turbulenta e considera-se o valor da componente viscosa da tensão cisalhante como negligenciável. Então temos a seguinte expressão:

$$-\overline{u'v'} = u^{*2} \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad \text{para } y > \delta' \quad (3.31)$$

Construindo-se um gráfico com os valores do extremo esquerdo da equação 3.31 e os valores $(1-y/h)$, e extrapolando-o para a parede ($y/h=0$) pode-se obter um valor aproximado da velocidade de cisalhamento u^* .

2. A variável u^* também pode ser calculada usando o método de Clauser, pelo qual, na região da parede: $\frac{y}{h} < 0,2$, a distribuição de velocidades é descrita pela equação 3.2, o valor k é suposto conhecido e os valores B e u^* são calculados a partir de um ajuste de reta.
3. Por meio do balanço de quantidade de movimento u^* é relacionado à declividade S e ao raio hidráulico R_h , pela expressão:

$$u^* = \sqrt{gR_h S} \quad (3.32)$$

4. Para um fluxo totalmente bidimensional ou fluxo com uma razão entre largura e altura do escoamento maior do que 6, a equação 3.32, pode ser escrita como:

$$u^* = \sqrt{ghS} \quad (3.33)$$

Onde h é a altura total do escoamento no canal.

Neste mesmo estudo, Muste e Patel (1997) discutem da conveniência do emprego de um ou outro método de cálculo da velocidade cisalhante. O primeiro método é o mais recomendável uma vez que os valores da tensão turbulenta tiveram um comportamento perfeitamente linear na região de análise onde $y > \delta$. O segundo método requer pelo menos 10 a 20 pontos de medição de velocidade. O terceiro e quarto método são os menos recomendáveis devido aos possíveis erros de medição da altura do escoamento.

3.3.5. Perfil de concentração

Uma aproximação clássica para determinar o perfil de concentração é a aplicação da equação de Rouse, deduzida a partir da teoria da difusão.

Seja um fluxo turbulento, permanente e uniforme para um canal retangular sem fluxo interno de sedimento dentro da seção. A equação total da difusão fica:

$$v \frac{\partial C}{\partial y} = \varepsilon_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (3.34)$$

onde ε_y é o coeficiente de mistura turbulenta para sedimento. A equação 3.34 pode ser integrada assumindo que $v' = -w$, obtendo-se

$$wC + \varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad (3.35)$$

e resolvendo a equação 3.35, encontram-se as concentrações C e C_a para dois pontos determinados do perfil de concentração y e y_a , para w e ε_y constantes.

$$\frac{C}{C_a} = \exp\left(-\frac{w}{\varepsilon_m}(y - y_a)\right) \quad (5.36)$$

Por outro lado, ε_m é o coeficiente de troca de momentum de Boussinesq presente na expressão da tensão cisalhante turbulenta $\overline{v'u'} = \rho_m \varepsilon_m \frac{\partial u}{\partial y}$, supondo que a tensão de cisalhamento turbulenta tenha um valor muito próximo da tensão cisalhante total. Todas estas expressões estão avaliadas a uma altura y referente ao fundo. Então tem-se a expressão seguinte:

$$\tau_{yx} = \rho_m \varepsilon_m \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.37)$$

isolando o coeficiente de troca de momentum,

$$\frac{\tau_{yx}}{\rho_m} \frac{\partial y}{\partial u} = \varepsilon_m \quad (3.38)$$

considerando que o coeficiente de mistura turbulenta de sedimento possa ser relacionado ao coeficiente de troca de momentum pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_y = \beta \varepsilon_m \quad (3.39)$$

onde β é o raio entre estes dois coeficientes, Ismail (1952) apud Garde e Ranga Raju (1978), e a tensão cisalhante total passa a ser expressa por:

$$\tau_{yx} = \rho_m g(h-y)S = \frac{\rho_m g h S (h-y)}{h} \Rightarrow \tau_{yx} = \frac{\rho_m u^{*2} (h-y)}{h} \quad (3.40)$$

sabendo que a velocidade cisalhante é

$$u^* = k y \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.41)$$

Substituindo 3.38, 3.40 e 3.41 em 3.39 obtém-se:

$$\varepsilon_y = \beta k u^* \frac{y}{h} (h-y) \quad (3.42)$$

Substituindo 3.42 em 3.35 e resolvendo a equação diferencial chega-se a seguinte expressão:

$$\frac{C}{C_o} = \left(\frac{h-y}{h-y_o} \frac{y_o}{y} \right)^Z \quad (3.43)$$

onde y_a e C_a são, respectivamente, a profundidade e concentração conhecidas num determinado ponto da altura da lâmina de escoamento; $Z = \frac{w}{\beta k u^*}$ é o número de Rouse, h é

a profundidade do escoamento.

O número de Rouse reflete a relação entre as propriedades do sedimento (w) e as características hidráulicas do escoamento (β , k e u^*). Sedimentos em suspensão de diâmetros muito pequenos terão uma velocidade de queda baixíssima, então $Z \rightarrow 0$, determinando perfis de concentração quase uniformes. No caso contrário, sedimentos com diâmetros maiores gerarão perfis com forte variação da concentração com a profundidade.

Para alguns pesquisadores, o valor de $\beta=1$ quando $k=0,40$ então tem-se:

$$Z = \frac{w}{ku^*} \quad (3.44)$$

Este número de Rouse simplificado foi empregado por Wang e Larsen (1994) como um critério para determinar se um sedimento dado encontra-se em arraste ou em suspensão. As partículas são carregadas por arraste se $Z > 5$ e quando $Z < 3$, estas se encontram em suspensão.

No estudo realizado por Kereselidze e Kutavaia (1995), o perfil de concentração experimental das partículas de carvão diferiu do perfil teórico de Rouse, mas apresentou uma variação vertical de concentração bem marcante.

Pode-se concluir ao final deste capítulo, que o estudo do perfil de velocidade de escoamentos com sedimentos em suspensão, envolve o conhecimento de uma série de parâmetros inter relacionados, que afetam de maneira direta as características dinâmicas do escoamento. Estes parâmetros necessitam de avaliações individuais e globais tal como o presente estudo se propõe a realizar.

4. METODOLOGIA

4.1. Apresentação

Como foi visto no capítulo 3, o estudo do efeito da presença de sedimentos em suspensão no perfil de velocidades, requer o conhecimento detalhado de variáveis que caracterizam o fluido e seu escoamento, conforme listado na tabela 3.3. Então, antes de proceder ao levantamento dos perfis de velocidade de um fluxo de água limpa ou com sedimentos em suspensão, é necessário o conhecimento dessas variáveis. Elas podem ser agrupadas naquelas que expressam as propriedades do fluido puro, do sedimento e da mistura água com sedimento em suspensão. Para poder atingir os objetivos deste trabalho foram desenvolvidas 7 etapas de atividades, que são detalhadas na tabela 4.1 e descritas a seguir,

1. Seleção do material de estudo (solos Brunizém Vértico, Terra Roxa e Vertissolo)
2. Determinação das propriedades do sedimento (curvas granulométricas e densidades do material grosso e fino dos solos em estudo)
3. Levantamento das propriedades reológicas dos sedimentos finos em suspensão, (testes preliminares para seleção de parâmetros de trabalho, testes de Tixotropia e Reopexia, levantamento dos reogramas e cálculo das viscosidades respectivas).
4. Concepção e a construção dos equipamentos necessários (tubo de Griffith e o conjunto canal de declividade variável, sonda de Pitot para medição de perfil de velocidades e coletor de sedimentos)

Tabela 4.1. Resumo da metodologia: etapas, atividades, objetivos e resultados.

Etapa Preliminar	Etapas	Atividades	Objetivos / Resultados
Seleção de Solos: Brunizém Vertico (Bv) Terra Roxa (Tr) Vertissolo (V)	1. Caracterização dos sedimentos	<ul style="list-style-type: none"> Determinação da curva granulométrica Determinação das densidades de material grosso e fino 	Determinação da % de material fino e grosso
	2. Propriedades Reológicas da mistura de água e sedimento fino	<ul style="list-style-type: none"> Preparação de amostras com diferentes concentrações volumétricas Testes preliminares para definição de parâmetros de trabalho Testes de Tixotropia e Reopexia Levantamento de reogramas 	Determinação da viscosidade dinâmica e cinemática
	3. Concepção e construção dos equipamentos necessários para a realização da pesquisa	<ul style="list-style-type: none"> Construção do tubo de Griffith Construção e montagem do canal de declividade variável Concepção/construção da sistema de medição de velocidade Concepção e construção do amostrador de sedimentos (coletor de amostra) 	Ensaio com canal de declividade variável
	4. Medição da velocidade de queda	<ul style="list-style-type: none"> Preparação de amostras com diferentes concentrações volumétricas Testes preliminares do tubo de Griffith Testes de velocidade de queda para areia média, fina e muito fina em água clara Testes de velocidade de queda para areia média, fina e muito fina na mistura água e sedimentos finos 	Curvas de variação de velocidade de queda em função da concentração volumétrica de mistura
	5. Medição do perfil de velocidades	<ul style="list-style-type: none"> Preparação da mistura água com sedimento para circular no canal Testes preliminares no canal Testes preliminares no sistema de medição de velocidade Ensaio para determinação do perfil de velocidade com água limpa Ensaio para a determinação do perfil de velocidade com mistura água com sedimentos para diferentes concentrações 	Curvas de velocidade adimensionalizadas e avaliação das mudanças dos parâmetros k e II com o aumento da concentração de sedimentos em suspensão
	6. Medição do perfil de concentrações	<ul style="list-style-type: none"> Testes preliminares Levantamento dos perfis de concentração 	Correlação entre a velocidade de queda e perfil de concentrações

5. Determinação da velocidade de queda dos sedimentos grossos em um fluido estagnado com material fino em suspensão (testes preliminares do funcionamento do tubo, seleção do sistema de entrada de amostra, cálculo da velocidade de queda com água limpa e cálculo da velocidade com água com sedimento em suspensão).
6. Estudo do perfil de velocidades em fluxo com sedimento de suspensão (testes preliminares de aferição do equipamento, perfil de velocidades para água limpa, perfil de velocidades com sedimento em suspensão com concentrações diferentes).
7. Testes de prova do coletor de sedimentos para uso no perfil de concentração.

A tabela 4.1 mostra que do total de 7 etapas, a primeira é considerada como etapa preliminar. As variáveis referentes às propriedades do fluido puro, neste caso massa específica e viscosidade cinemática da água, não foram consideradas como uma etapa, em vista que estas variáveis podem ser calculadas diretamente de tabelas. A velocidade cisalhante (u^*) citada na tabela 3.3, foi calculada de modo indireto empregando a expressão 3.3.1.

4.2. Seleção dos solos

Foram coletados três tipos de solos da região do estado do Rio Grande do Sul (RS) da República Federativa do Brasil, cujas características (tabela 4.2) já haviam sido levantadas por Albuquerque (1998).

Tabela 4.2. Características dos solos empregados.

Solo	Símbolo	Uso do solo	Mineralogia	Localização no Estado RS
Vertissolo	V	Campo nativa	Esmectítico	Santana do Livramento
Terra roxa	Tr	Mata nativa	Caulinítico	Bacia experimental de Pejussara
Brunizém vértico	Bv	Área agrícola	Caulinítico	Rio Pardo

Segundo os estudos de Albuquerque (1998), existe uma forte relação entre a erodibilidade em entressulcos e a mineralogia dos solos: Solos esmectíticos apresentaram menor erodibilidade que os cauliníticos. Dos sete solos da região do Estado do Rio Grande do Sul estudados por Albuquerque, só dois foram empregados no presente trabalho: Vertissolo (esmectítico) e Brunizém vértico (caulinítico). O solo Terra roxa (caulinítico) é interessante sob o ponto de vista institucional, pois o IPH possui uma série de estudos de erosão hídrica

em bacia experimental situada do Município de Pejuçara, região de origem deste solo.

4.3. Caracterização dos Sedimentos

Cada tipo de solo selecionado foi caracterizado através do levantamento das curvas granulométricas do material grosso (areia) e material fino (silte e argila) constituintes de cada solo, empregando, respectivamente, os métodos de peneiramento seco e de pipetagem.

Na determinação da porcentagem de material fino e grosso em cada solo foi empregada uma metodologia um pouco diferente daquela utilizada pelo laboratório de solos da Escola de Agronomia. Primeiramente, em cada solo foi feita uma pesagem com a amostra limpa (retirada de matéria orgânica grosseira tais como grosseira raízes, pedaços de folhas, etc.) e seca em estufa a 40° C. Cada amostra de solo foi diluída em água (volume de água aproximadamente o dobro do volume do solo) e a matéria orgânica queimada com peróxido de hidrogênio. Em seguida, a amostra é novamente seca, pesada e diluída. Uma quantidade de agente defloculante (Calgon, 5 ml para cada 100 gramas de solo) foi adicionada e a amostra é agitada por 15 minutos para uma melhor ação do defloculante. A amostra de solo diluída foi colocada numa peneira de 0,053 mm de abertura, com a finalidade de eliminar a porcentagem de material fino da amostra e obter uma amostra de solo composta por material grosso. Para facilitar essa operação, a peneira contendo a amostra foi lavada com mais água, sendo repetida até que a amostra tenha aparência de estar limpa. Após, foram queimados com peróxido de hidrogênio os restos da matéria orgânica ainda presentes na amostra de material grosso. Ao final, a amostra de material grosso foi secada em uma estufa a 40 °C, sendo realizada uma pesagem final do material.

Para a determinação da massa específica, tanto do material grosso (classes areia média, areia fina e areia muito fina) quanto do material fino, foi empregado o método do picnômetro.

A composição mineralógica, química e física dos solos Bv e V foram efetuadas utilizando métodos padrões de análise de solo adotados pelo Laboratório da Escola de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Albuquerque (1998). No anexo A é apresentado uma análise básica dos três solos em estudo.

Para descartar qualquer influência de elementos químicos presentes na água utilizada para a mistura com frações de solo, foi realizada uma análise padrão de sua qualidade apresentada no anexo B.

4.4. Propriedades Reológicas dos Sedimentos Finos em Suspensão

4.4.1. Preparo das amostras

Cada amostra de solo foi limpa de matéria orgânica grosseira, diluída em água destilada e peneirada em peneira com abertura 0,053 mm, a fim de separar os sedimentos com $d < 0,053\text{mm}$ (sedimentos finos). Em seguida, foram armazenadas em recipientes com água de modo que ocorresse decantação natural durante um período de duas semanas. Transcorrido esse tempo, é observado nos recipientes a formação de duas regiões: uma superior composta por água limpa e uma inferior composta pela mistura água-sedimento fino em alta concentração. A região flutuante de água limpa de cada recipiente foi retirada a fim de se obter uma amostra mais concentrada. As amostras concentradas foram diluídas em outros frascos com concentrações volumétricas diferentes (C_v) variando de 1, 3 e 6 %. Problemas no preparo das amostras fizeram com que as concentrações obtidas diferissem daquelas desejadas; por isso, cada amostra foi codificada em função do real valor de concentração volumétrica nela existente.

4.4.2. Sistema de medição das propriedades reológicas

O sistema de medição é formado por um viscosímetro digital programável com saídas para uma impressora, um sensor de temperatura e um computador.

O viscosímetro é do tipo de cilindros concêntricos: o cilindro de diâmetro maior (b') é oco e fixo na estrutura de suporte do viscosímetro, já o cilindro de menor diâmetro (a') e altura h' é móvel e fica encaixado dentro do cilindro maior, existindo entre os dois uma folga que é preenchida pelo fluido a ser analisado (figura 4.1). Na parte superior do cilindro menor existe uma rosca que permite seu acoplamento ao rotor do viscosímetro, de modo que o cilindro menor gire dentro do maior e submeta ao fluido à ação de uma deformação. O cilindro interno deve ser selecionado, permitindo fazer medições de viscosidade na faixa de 1 a 2000 cp, as velocidades angulares variam de 0 a 250 rpm e o torque máximo aplicado pelo rotor é de 673,7 dinas-cm.

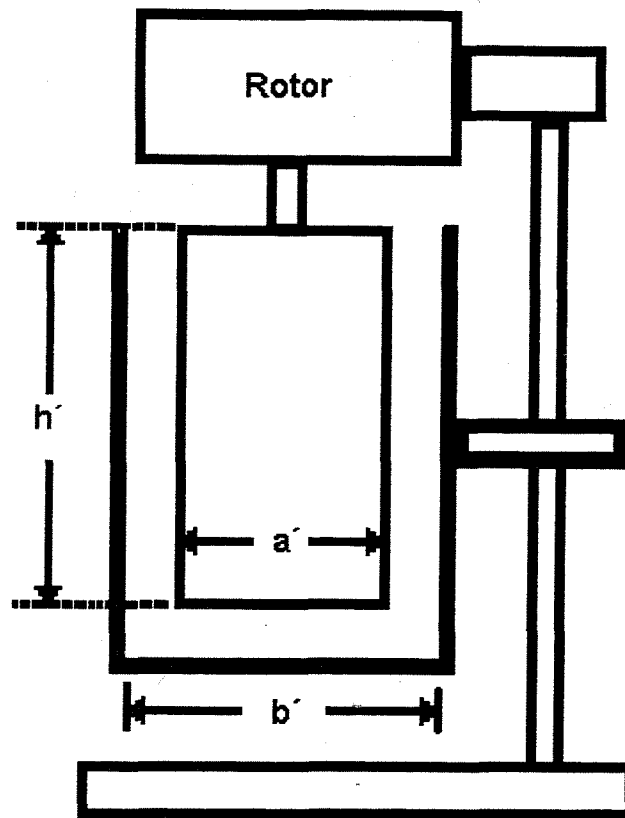


Figura 4.1. Viscosímetro de cilindros concêntricos.

O viscosímetro pode ser programado de duas maneiras: de forma direta, mediante o seu teclado ou de forma indireta, mediante o controle computacional feito através do software DvLoader. A vantagem deste último, é que permite aplicar seqüencialmente quatro programas operacionais do viscosímetro, diferentemente do primeiro que permite a aplicação de um só. Por estas razões, optou-se por empregar a programação externa mediante um computador. Uma das limitações deste sistema é que o Software em uso não permite armazenar no computador os resultados obtidos, permitindo apenas a impressão dos resultados mediante a saída da impressora, o que torna o processamento de dados muito laborioso, pois todo resultado impresso deve ser digitado manualmente. Por este motivo, programou-se o viscosímetro para que realize a impressão das seguintes variáveis consideradas fundamentais: a velocidade angular (r.p.m.), torque aplicado (% referente ao torque máximo do equipamento), temperatura em ° C (fornecidas pelo sensor térmico) e intervalo de tempo de cada leitura.

Considerando que a medição das propriedades reológicas no viscosímetro são realizadas em regime laminar, segundo recomendações do fabricante, a seleção das velocidades angulares de trabalho devem manter a razão RPM/cP não maior que 60rpm / 0.85cP, para que o fluido

entre os cilindros não alcance um regime de transição para o turbulento. O fabricante também sugere que os dados, cujos torques possuem valores menores de 10% do valor total, sejam descartados. Estes detalhes operacionais impõem a realização de testes prévios para determinação da velocidade angular máxima e mínima adequada de cada amostra.

4.4.3. Testes de Tixotropia e Reopexia

Antes da determinação dos reogramas para cada amostra, avaliou-se se todas elas poderiam apresentar um comportamento do tipo da Tixotropia ou da Reopexia, caracterizado por diminuição ou aumento da viscosidade com respeito ao tempo, quando o fluido é submetido a uma taxa de deformação constante, como foi descrito no capítulo 3. A importância destes testes reside em que, se alguma amostra apresenta um comportamento deste tipo, não será possível o cálculo exato de uma viscosidade que caracterize a amostra, pois ela muda com o tempo.

Os testes de Tixotropia e Reopexia consistem em submeter as amostras à ação de uma série de velocidades angulares constantes pelo intervalo de tempo de 25 minutos. Analisando os resultados impressos, procura-se ver se aconteceu alguma mudança na leitura do torque (medição indireta da tensão cisalhante) referente à aplicação da velocidade angular constante. Determinada a não existência de mudança significativa da tensão cisalhante, pode-se afirmar que o fluido não apresenta o fenômeno de Tixotropia ou Reopexia.

4.4.4. Levantamento do reograma

Para o levantamento do reograma (variação da taxa de deformação das amostras ensaiadas em função da tensão aplicada), as amostras foram submetidas, para cada teste, à ação de uma seqüência de velocidades angulares, crescente e decrescente, variando de 20, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 60, 50, 30 e 20 rpm, com cada velocidade agindo de 1'30" a 2'30" sobre a amostra.

A tensão cisalhante e a velocidade de deformação foram calculadas a partir dos dados digitados no computador (torque aplicado e velocidade de rotação do cilindro interno), aplicando as equações e as informações das dimensões geométricas dos cilindros concêntricos.

Os reogramas representam os gráficos das curvas da variação da tensão cisalhante com a

velocidade de deformação para cada amostra. O ajuste de curvas é feito mediante a aplicação dos modelos de ajuste sugeridos para cada tipo de fluido: newtoniano ou não newtoniano (capítulo 5 item 5.3.2).

4.5. Concepção e Construção dos Equipamentos

A necessidade da determinação das variáveis apresentadas na tabela 3.3, motivaram a concepção e construção de uma série de equipamentos.

O tubo de Griffith teve a finalidade de determinar a velocidade de queda em água limpa, do material grosso empregado na pesquisa, assim como avaliar o efeito da concentração de um fluido de mistura de água com material fino, sobre a velocidade de queda de material grosso para um mesmo tipo de solo.

O canal de declividade variável, teve a finalidade de servir como o meio no qual se desenvolveria o escoamento com sedimento em suspensão.

O sistema de medição de velocidade teve como finalidade a determinação do perfil de velocidade do escoamento, tanto com água limpa como com sedimento em suspensão. Fazem parte do sistema de medição da velocidade: uma sonda tipo Pitot, um piezometro inclinado para leitura da coluna da pressão total do escoamento (dinâmica e estática), e um recipiente para a calibração das leituras da sonda tipo Pitot.

4.5.1. Tubo de Griffith

O equipamento construído é similar ao empregado pelos pesquisadores australianos da universidade de Griffith, Hairsine e Mc Tainsh (1986), o qual é uma adaptação do Siltômetro, sendo denominado como tubo de Griffith.

Este equipamento é constituído por três partes principais (figuras 4.2 e 4.3): na parte superior encontra-se um aparelho para a introdução da amostra de material grosso dentro do tubo; na parte intermediária observa-se o tubo de decantação e, na parte inferior, se encontra uma bandeja giratória para a coleta da amostras de material grosso.

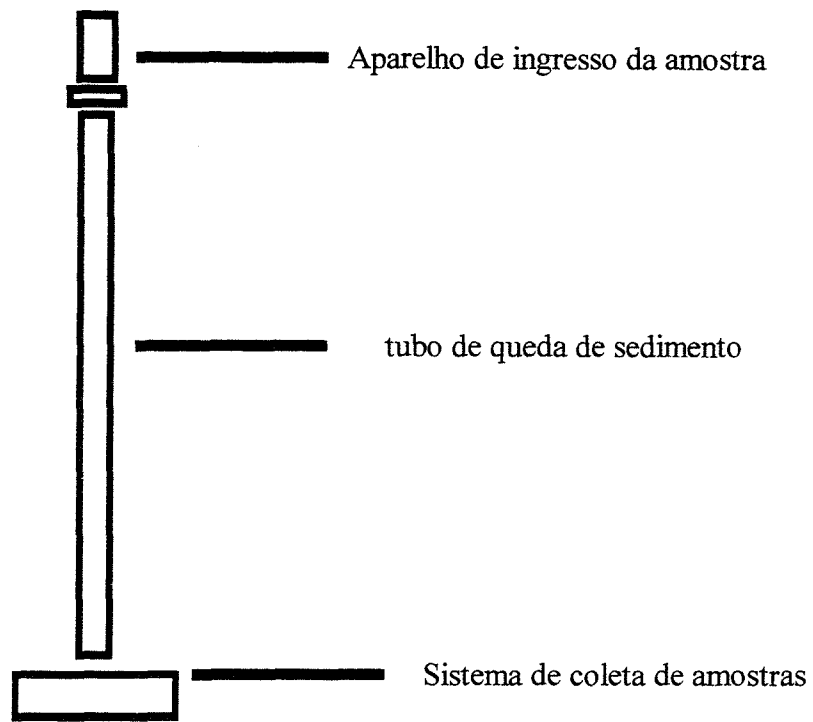


Figura 4.2. Partes do Tubo de Griffith

Estas três partes possuem como suporte uma estrutura metálica composta por uma barra de aço perpendicular a uma base retangular de aço.



Figura 4.3. Vista total do Tubo de Griffith

O aparelho para o ingresso da amostra foi projetado para introdução de amostras não

coesivas de material grosso dentro do tubo (Figura 4.4). Observa-se uma caixa de acrílico dentro da qual um copo contendo a amostra de material granular não coesivo é preso em um eixo que, mediante o acionamento de uma manivela externa, gira, deixando-o cair dentro do tubo. Na parte superior da caixa encontra-se uma tampa cônica de acrílico empregada para selar a caixa, cuja parte inferior encontra-se colada ao tubo.

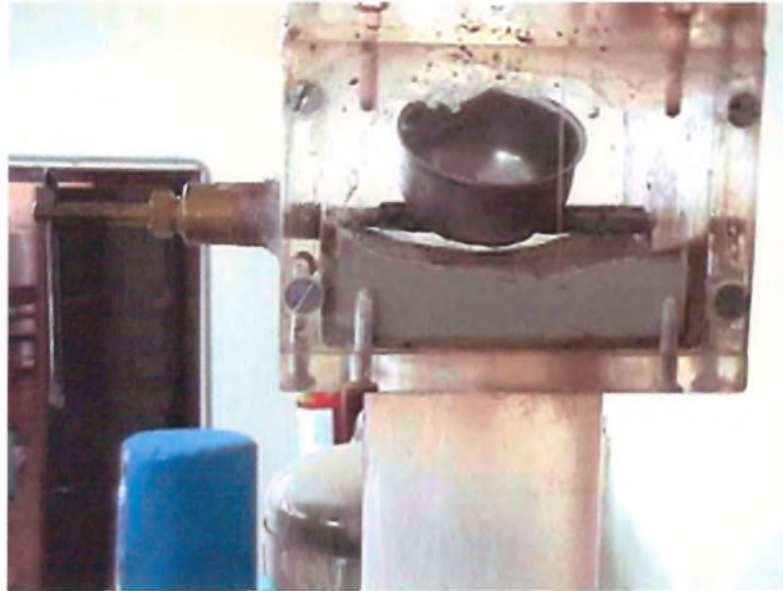


Figura 4.4. Sistema de entrada de amostra manual.

O tubo de decantação de acrílico tem 2 m de comprimento, 70 mm de diâmetro externo e 60 mm de diâmetro interno, encontrando-se preso por três braçadeiras a um trilho de alumínio. Esse conjunto, tubo e trilho de alumínio, podem ter um leve movimento vertical de alguns centímetros, para cima e para baixo, mediante o acionamento de uma pequena alavanca.

O sistema de coleta consiste em um conjunto circular giratório, composto por uma bandeja com 70 cm de diâmetro externo e uma altura de 10 cm construída de aço que gira em seu próprio eixo. Na figura 4.5 (a) observam-se os dezenove pequenos recipientes de coleta colocados dentro da bandeja maior, os quais recebem, pouco a pouco, o material decantado proveniente do tubo. No fundo da bandeja maior, observa-se um tampão de borracha que se encaixa na parte inferior do tubo, selando-o em sua fase de enchimento.

O princípio de operação do tubo de Griffith consiste em manter uma coluna de água dentro do tubo, que trabalhará com uma pressão negativa aproximada de 2 m. A amostra de material grosso seco a injetar no tubo é colocado dentro do copo situado na caixa de acrílico (aparelho para introdução da amostra), sendo lançado dentro da coluna de decantação. Uma

vez vertido dentro do tubo, este material iniciará um processo de queda: a primeira parte do material que sai do tubo é coletada pelo primeiro recipiente do sistema de coleta. Após um dado intervalo de tempo, gira-se o sistema de coleta, colocando a parte inferior do tubo de decantação sobre o recipiente de coleta que segue ao primeiro, e assim, sucessivamente, por diferentes intervalos de tempo previamente definidos pelo usuário, considerando a natureza da amostra. Maiores detalhes do uso do equipamento estão descritos no anexo D.



Figura 4.5. Sistema de coleta, a) Bandeja maior giratória com recipientes de coleta e b) detalhe do recipiente de coleta.

4.5.2. Canal de Declividade Variável

Os estudos detalhados de escoamentos com alta carga de sedimentos requerem equipamentos sofisticados, de grandes dimensões e de custo operacionais caros. Optou-se por desenvolver um equipamento que permitisse tal estudo, reduzindo ao máximo os custos. Foi então projetado um canal de pequenas dimensões (para diminuir custos em material), prático e que permitiria o desenvolvimento do estudo do escoamento com sedimento em várias condições de declividade e concentração de sedimentos.

O canal foi instalado dentro do Pavilhão Fluvial do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O material empregado para sua construção foi acrílico, sendo composto por uma seção retangular com 15 cm de altura, 12 cm de largura, e um comprimento de 3 m. O canal se sustenta em dois tripés, os quais permitem mudar sua declividade na faixa de 0 a 10 °.

Um sistema de circulação fechada, alimentado por uma bomba de 1/2 HP para água limpa com vazão máxima de 1,2 l/s, permite manter o escoamento dentro do canal. O abastecimento de água é feito a partir de uma linha de sucção conectada a um reservatório com capacidade de 250 l. Da bomba saem duas linhas de $\frac{3}{4}$ " , uma conectada à entrada do canal e a outra ao retorno ao reservatório. Cada linha conta com registro para regulagem da vazão. Após a entrada do canal, foi colocado um sistema de tranquilização que antecede a seção retangular do canal. No fim do canal foi instalado um pequeno vertedor para facilitar a medição volumétrica da vazão.



Figura 4.6. Vista do canal.

4.5.3. Sistema de medição de velocidade

A concepção deste sistema consistiu no desenvolvimento de um equipamento para medição do perfil de velocidades em escoamentos com uma alta taxa de sedimentos em suspensão, que seja de fácil uso, de dimensões diminutas e barato. O sistema de medição de velocidades, é composto por: uma sonda de Pitot, uma ponta linimétrica, um paquímetro, uma estrutura de suporte de alumínio, um piezômetro inclinado e um tanque para a calibração estática das leituras da sonda de Pitot.

A concepção teórica do equipamento parte de uma adaptação de uma sonda tipo Pitot pressurizada feita a partir do trabalho de Wang (1993). Baseados na concepção teórica apresentada na figura 4.7, parte-se do princípio de que a altura total do escoamento com

sedimento num ponto qualquer, determinará uma altura equivalente em água limpa. Supõe-se que a única forma de transferência de sedimentos entre a sonda Pitot, enchida com água limpa, e o escoamento com sedimento é via difusão molecular, forma de transferência de massa pouco rápida, podendo-se considerar que os dois fluidos sejam imiscíveis.

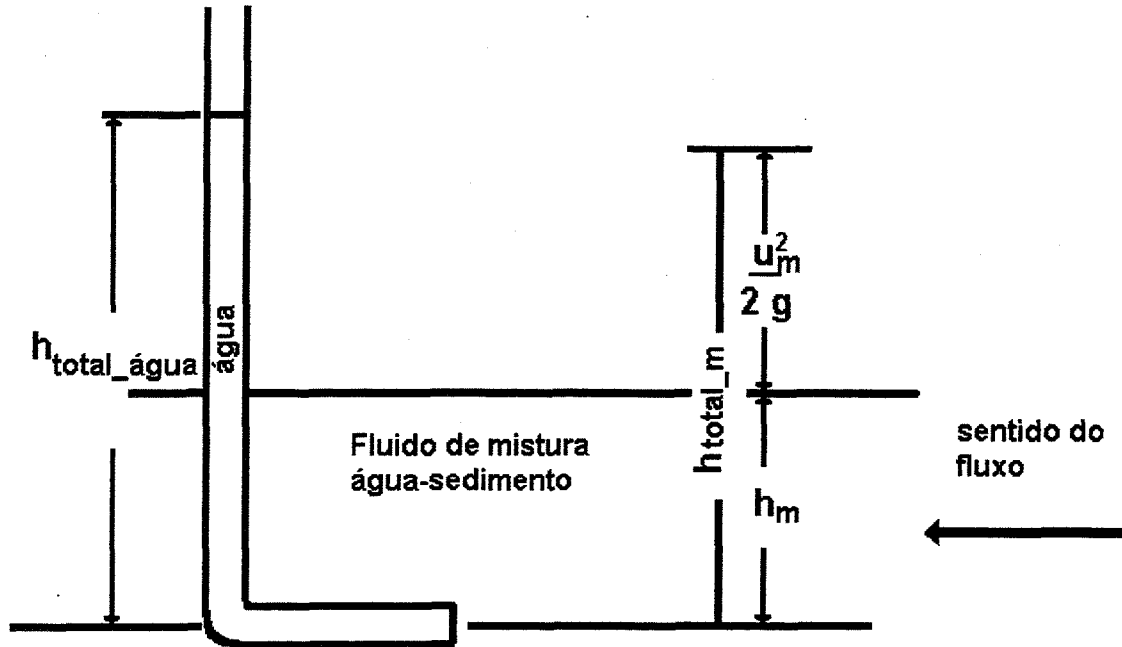


Figura 4.7. Sonda tipo Pitot concepção teórica

Da figura 4.7 se realiza o seguinte equacionamento:

$$\rho_m = \rho + (\rho_s - \rho)Cv \quad (4.1)$$

$$\rho_m h_m + \rho_m \frac{u_m^2}{2g} = \rho_m h_{total_m} \quad (4.2)$$

$$\rho_m h_{total_m} = \rho h_{total_agua} \quad (4.3)$$

$$\rho_m h_m + \rho_m \frac{u_m^2}{2g} = \rho h_{total_agua} \quad (4.4)$$

$$h_m + \frac{u_m^2}{2g} = \frac{\rho}{\rho_m} h_{total_agua} \quad (4.5)$$

$$u_m^2 = 2g \left(\frac{\rho}{\rho_m} h_{total_agua} - h_m \right) \quad (4.6)$$

$$u_m = \sqrt{2g \left(\frac{\rho}{\rho_m} h_{total_agua} - h_m \right)} \quad (4.7)$$

Onde ρ e ρ_m são as massa específicas da água e da mistura, respectivamente, C_v é a concentração volumétrica, h_{total_m} e h_m são respectivamente as alturas total e estática do escoamento com sedimento, $h_{total_água}$ é a altura total da água equivalente à altura total do escoamento com sedimento e u_m é a velocidade do escoamento com sedimento.

A sonda de Pitot foi confeccionada em aço inox com 1,5 mm de diâmetro externo e 1mm de diâmetro interno, aproximadamente, a partir de seringas de uso cirúrgico. Uma ponta linimétrica desmontável foi colocada atrás da sonda de Pitot (figura 4.8b), de forma a permitir a avaliação da profundidade da lâmina de água. Ao mesmo tempo, essa ponta serve como trava de segurança para que o Pitot não sofra nenhum dano no momento de se aproximar do fundo do canal.

Da figura 4.8.a, observa-se que o conjunto, ponta linimétrica e a sonda de Pitot, está conectado a uma peça de acrílico, da qual sai uma tomada de mangueira que liga o Pitot a um piezômetro inclinado. Esta peça de acrílico se encontra aparafusada a um paquímetro, com um erro de medição de 0.01mm. O paquímetro encontra-se preso a uma placa central móvel pertencente a estrutura de suporte do sistema feita em alumínio. O sistema de medição de velocidades foi colocado sobre o canal numa distância de 1,80m à jusante do coletor de entrada e a sonda de Pitot foi posicionada no meio da seção transversal do canal.

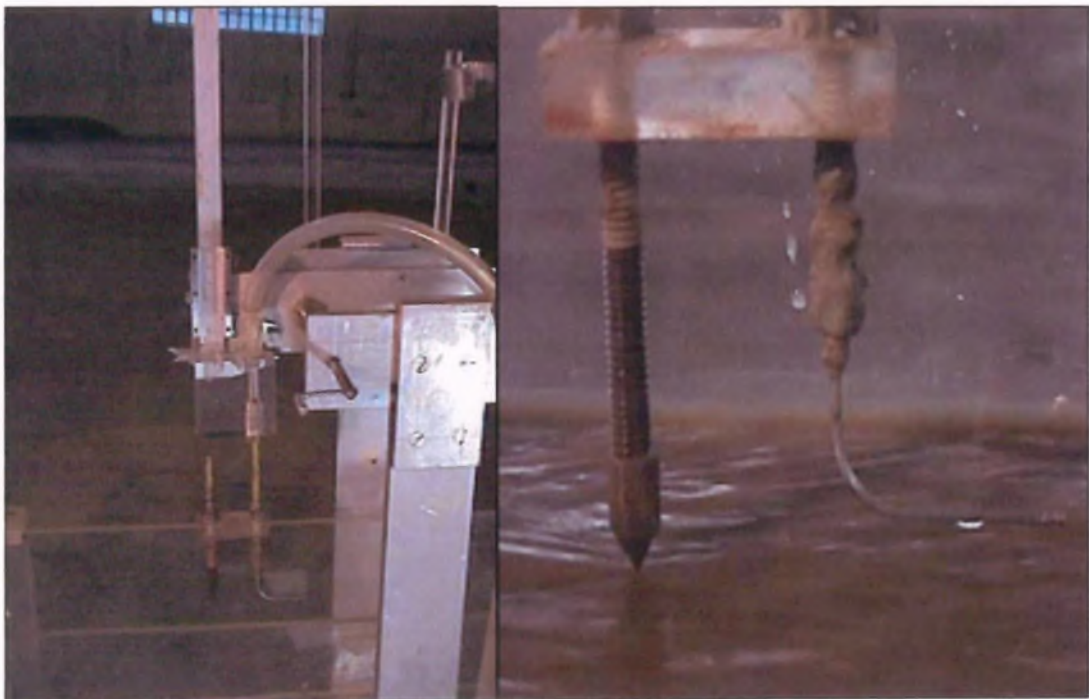


Figura 4.8. Sonda tipo Pitot: a) vista do conjunto: estrutura de suporte, paquímetro para medição, acrílico com tomada de mangueira e sonda; b) Detalhe da sonda, mostrando a ponta linimétrica acoplada.

Um piezômetro inclinado foi utilizado para medir as colunas indicadoras das pressões estática e dinâmica fornecidas pela sonda tipo Pitot (Figura 4.9). Esse equipamento é constituído por um tubo de vidro, preso a uma placa de acrílico. Para realizar a leitura da coluna inclinada da água, emprega-se uma régua, com 0,5 mm de erro de medição, colocada de forma paralela ao tubo de vidro. A leitura é feita mediante o menisco de água formado dentro do tubo. A placa de acrílico, na qual vão colados o tubo de vidro e a régua, possui um furo, no qual encaixa um eixo, que permite variar seu ângulo de inclinação. O suporte do piezômetro inclinado é composto por uma barra de aço colocada perpendicular a uma placa de aço.

Para a calibração do Pitot construiu-se um pequeno recipiente de acrílico com 50 cm de comprimento, 10 cm de largura e 10 cm de altura. Detalhes do processo de calibração são descritos no anexo E.



Figura 4.9. Detalhe do piezômetro inclinado conectado à sonda tipo Pitot.

4.5.4. Amostrador de Sedimentos

Para a medição da variação da concentração dos sedimentos com a profundidade, foi construído um amostrador de sedimentos. A estrutura de suporte do equipamento foi quase a mesma do sistema de medição de velocidade. O amostrador é constituído por uma sonda coletora, um paquímetro de medição e de uma estrutura de suporte de alumínio.

A sonda coletora (figura 4.10a) é formada pela união de dois tubos de diferentes materiais e diâmetros. O primeiro é de aço e foi confeccionado a partir de uma seringa de uso cirúrgico, de 2 mm de diâmetro externo e 1,5 mm de diâmetro interno. O segundo é um tubo de cobre de 3 mm de diâmetro interno. O tubo de aço fica em contato direto com o escoamento, devido a seu menor diâmetro. A parte superior tubo de cobre é conectada a uma peça de acrílico. De maneira similar ao sistema de medição de velocidade, a peça de acrílico fica presa a um paquímetro para medição da profundidade, que por sua vez une-se a uma estrutura de alumínio (figura 4.10b).

A extremidade do tubo de cobre é conectado por meio de uma mangueira de silicone a um dos dois bicos da tampa de uma garrafa de amostras (um litro de volume) que se encontra em um nível mais baixo em relação ao escoamento.

O processo de coleta inicia-se aplicando uma leve sucção no bico da tampa da garrafa de coleta que não está conectado à mangueira, gerando um sifonamento do escoamento que está em contato com a sonda coletora para a garrafa de amostra.

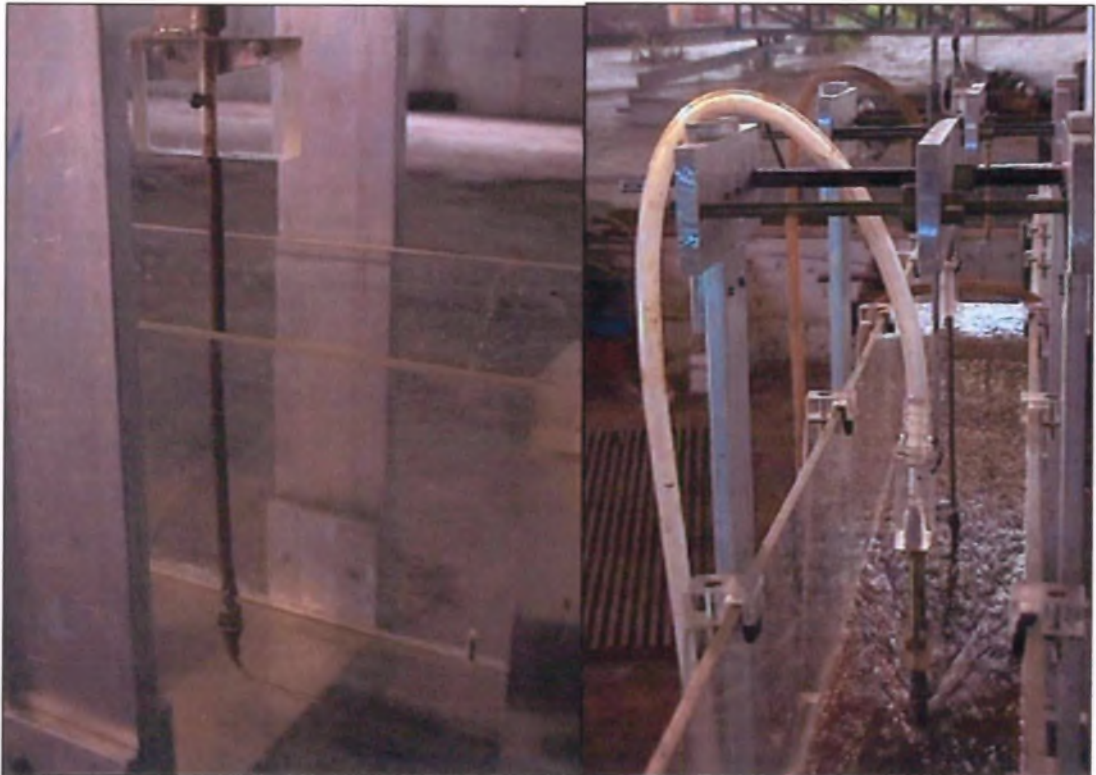


Figura 4.10. a) Tubo coletor de sedimentos e b) vista das duas estruturas mecânicas de suporte para o tubo de Pitot e tubo coletor de sedimento.

4.6. Determinação da Velocidade de Queda dos Sedimentos Grossos em um Fluido Estagnado com Material Fino em Suspensão

Considerando que o experimento tem como objetivo quantificar o efeito de diferentes concentrações de sedimento fino (C_v) na velocidade de queda de sedimentos grossos (neste caso restrito às classes de areia média, areia fina e areia muito fina), procurou-se encontrar uma técnica que permitisse manter a mistura de fluido com material fino em suspensão o mais homogênea possível, a fim de quantificar a velocidade de queda sem problemas nem erros de medição.

O experimento se dividiu nas seguintes fases:

a) **Seleção de critérios para aferição do tubo de Griffith:** Os valores experimentais da velocidade de queda em cada teste serão comparados com os valores teóricos obtidos das equações de Van Rijn (1989), Concharov (1992) e Cheng (1997), citadas no capítulo 3. Objetiva-se criar critérios para a avaliação do grau de erro do tubo, bem como ajuda nas fases

de comparação entre os dois sistemas de admissão da amostra testados e da seleção de quantidade padrão de amostra de cada teste.

b) **Estabelecimento do tempo de cada teste:** o tempo de duração total de cada teste é dado pela soma do tempo teórico (segundo Stokes) necessário para que a partícula de menor diâmetro por classe (para areia média o limite inferior da classe é 0,25 mm, para areia fina o limite inferior da classe é 0,125 mm e para areia muito fina o limite inferior da classe é 0,053 mm) percorra a distância de 2 m do tubo, mais um tempo de segurança correspondente ao 50% do tempo teórico de Stokes.

c) **Testes preliminares com o sistema automático de admissão da amostra:** o tubo de Griffith original possui um sistema automático de admissão da amostra, o qual é constituído por um solenóide elétrico, que possui uma trava que segura o copo que contém as amostras de material grosso. Ativado o solenóide mediante uma chave externa, a trava deixa o copo, fazendo que ele gire e jogue o material grosso dentro do tubo. Para verificar o correto funcionamento do equipamento com este tipo de sistema, bem como dominar sua utilização, procedeu-se a uma série de testes preliminares em água limpa (torneira) para a quantificação da velocidade de queda da areia fina oriunda do solo Brunizém Vértico e da Terra Roxa. Devido ao fato de que os resultados apresentaram valores muito altos para a velocidade de queda (a força de entrada do material no tubo criou uma forte aceleração no início do percurso), optou-se por um sistema de entrada manual.

d) **Testes preliminares com sistema manual de admissão da amostra:** programou-se uma série de testes iniciais com a areia fina oriunda do solo Brunizem Vértico e da Terra Roxa. Foi observada uma melhora nos resultados devido à diminuição da aceleração de entrada do sedimento.

e) **Testes da escolha da quantidade padrão de sedimento grosso a se empregar:** com a finalidade de avaliar qual é a quantidade de sedimento por amostra a ser utilizada em cada teste, realizou-se uma gama de testes repetitivos com um grupo de amostras de diferentes quantidades (2,5; 5 e 10 g) de areia fina de Brunizém Vértico. Os resultados não mostraram muita diferença entre si e se optou pela escolha da quantidade de 5 g por amostra como padrão

em cada teste. A amostra com 2,5 g aumenta o risco de perda de material em cada teste, já a quantidade de 10 g requer um volume maior de material a ser extraído dos solos em estudo.

f) **Testes para medição da velocidade de queda em água limpa:** a finalidade desse teste é servir como base comparativa para avaliar o efeito da concentração na velocidade de queda de material grosso, isto é, os testes em água limpa representam o efeito zero da concentração de sedimento ($C_v=0$).

Para cada solo em estudo foram realizados três testes repetitivos para cada uma das três classes do material grosso (areia média, fina e muito fina). Em cada teste também mediu-se a temperatura da água.

Tabela 4.3. Resumo de testes programados para cálculo de velocidade de queda em água limpa

Tipos de solos	3	Brunizém Vertico, Terra Roxa e Vertissolo
Classes analisadas de material grosso para cada tipo de solo	3	Areia Média, Fina e Muito Fina
Número de testes repetitivos por classe	3	
Total de testes	27	

g) **Preparação do material fino a ser colocado em suspensão:** o solo Brunizém Vértico foi seco ao ar e após foi moído com um rolo. A matéria orgânica grosseira (raízes, pedaços de folhas, etc.) foi retirada passando o solo em uma peneira de 0,50 mm de abertura. Após, o solo foi novamente peneirado de forma seca, em um conjunto de peneiras cujo diâmetro menor foi de 0,053 mm. No processo de seleção do material retido nas peneiras, foram descartadas as frações correspondente a material grosso e só foi considerado o material fino que passou pela menor peneira (0,053 mm). Foram empregados aproximadamente uns 100 kg de solo natural para obter 10 kg de material fino.

Os solos Terra Roxa e Brunizém Vértico tiveram o mesmo tratamento: primeiro, diluiu-se uma quantidade aproximada de 100 kg de cada solo em tonéis com capacidade de 120 l. Uma vez totalmente diluído o solo, peneirou-se a mistura com malha 0,30mm de abertura para outro tonel. Após realizou-se um segundo peneiramento em uma malha de 0,053 mm de

abertura, obtendo-se uma quantidade de sedimento fino razoável para a realização dos experimentos. Como o material fino contido no tonel possui uma concentração baixa, deixou-se o material em suspensão em repouso por algumas semanas, transcorrido esse tempo o material fino se precipitou totalmente no fundo, então se retirou o sobrenadante de água limpa por sifonamento e obteve-se uma alta concentração de material fino, o que possibilita a sua diluição com água a fim de conseguir as concentrações necessárias em cada teste. Deve-se mencionar a dificuldade e a lentidão do processo de peneiramento tanto via seca como úmida.

h) Testes preliminares para medição da velocidade de queda para os solos em água com material fino em suspensão: esses testes preliminares tiveram como objetivo avaliar os problemas que envolvem o fato de procurar manter da forma a mais homogênea possível uma fluido de mistura de água e material fino em suspensão, a fim de diminuir erros experimentais.

Um primeiro teste preliminar consistiu em avaliar se o tempo de permanência em suspensão do material fino era compatível com o tempo de cada teste. Uma mistura de água com material fino em suspensão oriundo do solo Brunizém Vértico, com $C_v = 3\%$, aproximadamente, foi colocada dentro do tubo de Griffith. Após foi cronometrado o tempo de teste da classe de areia muito fina desse solo, com base no tempo teórico. No transcorrer do tempo, observou-se a formação de uma coluna estratificada, sendo que, no final do tempo teórico de teste a coluna se tinha dividido em dois estratos bem definidos. Testes similares com os solos Terra Roxa e Vertissolo mostraram resultados similares, sendo que o último apresentou a menor estratificação da coluna. Concluiu-se ser necessário o emprego de um agente defloculante para manter homogênea a coluna de material fino em suspensão.

Um segundo teste preliminar consistiu na necessidade de avaliar o efeito corrosivo do agente defloculante sobre as partes de acrílico e metálicas do tubo de Griffith. Uma peça de acrílico foi mergulhada dentro de um Becker contendo mistura do fluido com o agente defloculante. Após transcorrido um dia, retirou-se o acrílico do frasco e observou-se, uma vez lavada a peça, que não tinha sofrido nenhum dano na sua superfície. Para avaliar o efeito do defloculante sobre as partes metálicas do tubo, fizeram-se duas experiências, uma delas consistiu em encher o recipiente ou bandeja maior do sistema de coleta com um fluido de mistura do solo Vertissolo, com $C_v=6$, aproximadamente, nela mergulhando os recipientes de coleta. Transcorridas algumas horas, retirou-se o fluido, o qual foi guardado para uma outra

experiência, da qual falaremos mais adiante, e observou-se que a pintura anti-corrosiva da bandeja maior tinha sofrido desprendimento e diluição em algumas partes da sua superfície, também constatou-se mudanças na superfície dos recipientes de coleta que tornou-se áspera e perdeu brilho. Uma outra experiência foi a avaliação do efeito corrosivo do agente defloculante sobre as peças inox (material de construção do viscosímetro), uma bandeja de inox foi enchida com o fluido de mistura contendo agente defloculante, após um dia de contato, a bandeja foi lavada e se constatou a presença de manchas sobre a superfície do inox. Esse resultado permitiu descartar o emprego do viscosímetro para o levantamento das propriedades reológicas do fluido de mistura utilizado em cada teste.

Um terceiro teste preliminar consistiu em saber se era possível fazer vários testes de determinação da velocidade de queda para uma dada concentração ($C_v=7,11$), sem a necessidade de trocar o fluido de mistura dentro do tubo de decantação, isto é, saber se é possível reciclar o fluido de mistura, a fim de poupar material fino e aumentar o número de repetições dos testes. Então, foi realizada a experiência para a determinação da velocidade de queda da areia muito fina, oriunda do solo Vertissolo, empregando o fluido de mistura reciclado da experiência anterior, sendo o resultado comparado com a velocidade de queda obtida em água limpa para a mesma classe. Verificou-se que ambas as velocidades apresentaram valores próximos. Este resultado foi imprevisto pois esperava-se que a velocidade de queda do sedimento que se precipita em um fluido de mistura de água-sedimento fino fosse muito menor que a velocidade do mesmo sedimento em água limpa, devido à influência da concentração e as dimensões diminutas da areia fina. Esse resultado discordante é explicado pelo fato de que o fluido de mistura reciclado haver sofrido mudanças internas, possivelmente devido à ação da pintura diluída pelo agente defloculante do recipiente maior.

Por tal motivo, optou-se pelo seguinte procedimento experimental para cada teste: encher o tubo de decantação e sistema de coleta com a mesma mistura com água e material fino em suspensão (devido ao defloculante). Após finalizado o teste, preparar o tubo para um novo teste, no qual o fluido de mistura na bandeja de coleta permanece sendo o mesmo do teste anterior e só colocamos um novo fluido de mistura no tubo de decantação. Finalizados os testes correspondentes a uma dada concentração, troca-se todo o fluido de mistura e realiza-se uma limpeza geral do equipamento.

Detalhes do processo de medição da velocidade de queda no tubo de Griffith pode ser encontrado no anexo D.

i) **Testes para medição da velocidade de queda em água com material fino em suspensão:** uma vez solucionado o problema de como manter o material fino em suspensão, programou-se uma série de testes para cada tipo de solo (tabela 4.4).

Tabela 4.4. Resumo do total de testes para determinar o efeito da concentração na velocidade de queda de material grosso

Tipos de solos para análise	3	Brunizém Vértico, Terra Roxa e Vertissolo
Quantidade de concentrações volumétricas do fluido de mistura com água e material fino para cada tipo de solo	3	Concentrações Volumétricas variando na faixa de <0,5% a 8%>
Classes de material grosso consideradas para a análise da velocidade de queda para cada concentração de cada tipo de solo,	3	Areia Média, Fina e Muito Fina
Testes repetitivos por classe	3	
Total de testes	81	

4.7. Estudo dos Perfis de Velocidades e Concentração em Fluxo com Sedimento em Suspensão

O objetivo principal dessa fase da pesquisa foi poder avaliar o efeito da presença de sedimento em suspensão no comportamento do fluxo dentro do canal, observado mediante a análise do perfil de velocidade. Os primeiros testes foram do tipo preliminar e serviram para definir os parâmetros de operação do canal e do sistema de medição de velocidades, bem como para definir uma metodologia de cálculo da velocidade. Os testes de medição do perfil de velocidade em água limpa serviram como base comparativa para os outros perfis determinados para o escoamento de uma mistura com água e sedimento em diferentes concentrações volumétricas e assim avaliar o efeito da presença do sedimento em suspensão sobre o perfil de velocidade. Devido a restrições econômicas e de cunho prático, a pesquisa abordou lâminas de escoamento de pouca espessura (8mm a 5,5 mm) dentro de um canal de pequenas dimensões.

a) **Testes preliminares do funcionamento do canal:** os testes preliminares foram realizados com a finalidade de selecionar os parâmetros de funcionamento do canal.

O primeiro teste consistiu na seleção da declividade de trabalho. Por razões práticas consideramos só duas declividades facilmente encontradas nas vertentes das bacias (5% e 8,7%), a fim de ter uma base mínima comparativa da avaliação do efeito da declividade no escoamento. O segundo teste consistiu na seleção das vazões de trabalho, já que a potência da bomba permite uma vazão máxima de 1 l/s e que vazões menores que essa produzem escoamentos com alturas menores a 6 mm, para o caso das duas declividades selecionadas. Então optou-se por trabalhar com a máxima vazão fornecida pela bomba, e assim conseguir a maior altura de escoamento possível.

b) **Testes preliminares do sistema de medição de velocidade:** Um dos primeiros testes do sistema de medição de velocidade foi a escolha do ângulo de inclinação do piezômetro inclinado. Este equipamento tem como função aumentar a resolução da leitura da pressão dinâmica e estática do escoamento, expressa através de uma coluna de água dentro de um tubo de vidro. A leitura exata da coluna é feita considerando o menisco de água, formado na parte superior da coluna de água dentro do tubo, que coincide com uma marca de medição de uma régua colocada de forma paralela ao tubo. A posição do tubo pode variar desde a vertical até a horizontal (90° até 0°). À medida que se diminui o ângulo de inclinação, aumentamos a resolução, mas também aumentamos os efeitos da capilaridade que afetam as leituras do menisco de água da coluna.

Com o canal em funcionamento, com água limpa e declividade de 5%, procedeu-se a uma série de medições repetitivas de três pontos do perfil de velocidade com diferentes inclinações do tubo de vidro. Os ângulos de 15, 20 e 30 graus foram testados, adotando-se a inclinação de 20 graus como padrão, pois foi o menor ângulo a não apresentar problemas na leitura da coluna originados por efeitos da capilaridade.

c) **Testes preliminares de medição de uniformidade transversal do perfil de velocidade para água limpa:** estes testes tiveram como objetivo avaliar a possibilidade de considerar como perfil representativo do escoamento, um perfil de velocidade determinado em uma única posição da seção transversal. Para tanto é necessária a verificação da uniformidade

da velocidade na seção transversal do canal. Por tal motivo, realizou-se uma série de testes no canal, com água limpa e com as duas declividades selecionadas. Dentro de cada teste foram levantadas uma série de medidas ao longo da seção transversal do canal, as quais constam de leituras da coluna de água no piezômetro inclinado, fixando-se três profundidades. Os resultados mostraram que os perfis transversais de velocidade são bem uniformes, isto é, não se observou nenhum efeito das paredes do canal sobre o perfil de velocidade transversal, o que permitiu a adoção do centro da seção transversal do canal como única posição de medição de perfil de velocidade para cada teste.

d) **Testes de medição do perfil de velocidade para água limpa:** num primeiro momento, procedeu-se à realização de uma série de testes para avaliar sua variabilidade no tempo. Programou-se a medição do perfil de velocidade na seção central do canal, em diferentes datas e sob as mesmas condições de operação: vazão máxima e declividades de 5 e 8.7%. Num segundo momento, esses dados foram usados para medir o erro de leitura do sistema de medição de velocidade. Os perfis de velocidade foram integrados ao longo da altura do escoamento, sendo determinada a velocidade média do perfil,

$$U' = \frac{\int_0^h u dy}{h} \quad (4.8)$$

onde U' é a velocidade média calculada a partir da integração do perfil de velocidades medido, u é a velocidade na altura referente ao fundo y , h é a altura total do escoamento. Após comparou-se esse resultado com a velocidade média do escoamento u_m , calculada a partir da razão entre vazão total Q (obtida pelo método volumétrico) e a área da seção transversal do escoamento obtida pelo produto da altura de escoamento h vezes a largura do canal b .

$$U = \frac{Q}{hb} \quad (4.9)$$

e) **Obtenção de material:** o material para circular no canal foi obtido aplicando uma metodologia similar à empregada na obtenção do material fino para os testes da determinação da velocidade de queda com diferentes concentrações volumétricas; tendo porém, a diferença de que no final do processo, em lugar de usar uma peneira 0,053 mm de abertura foi empregada uma peneira de 0,25 mm de abertura, isto é, trabalhou-se com sedimentos na faixa de areia fina, areia muito fina, silte e argila.

f) **Testes de medição dos perfis de velocidade para escoamentos com diferentes concentrações de sedimento em suspensão para os solos em estudo:** foram levantados os perfis de velocidade em escoamentos com fluidos de mistura com sedimentos (areia fina, areia muito fina, e silte e argila), em concentrações incrementadas sistematicamente, a fim de observar o efeito do aumento da concentração de sedimento em suspensão sobre o perfil de velocidade (tabela 4.5).

Tabela 4.5. Resumo dos testes de medição do perfil de velocidade para escoamento com sedimento em suspensão

Tipo de solos testados	3	Brunizém Vertico, Terra roxa e Vertissolo
Declividades testadas para cada tipo de solo	2	5% e 8,7%
Número de concentrações testadas para cada tipo de solo	2 para (*) 3 para (**)	(*) Brunizém Vértico (**) Terra Roxa e Vetissolo variando na faixa de $C_v = 0,5$ até 8%
Número de repetições de medição de perfis de velocidade por teste	3	A medição de cada perfil de velocidade foi repetida no mínimo por 3 vezes

Detalhes do processo de medição do perfil de velocidades pode ser encontrado no Capítulo 5, item 5.5.2.

4.8. Estudo dos Perfis de Concentração em Fluxo com Sedimentos em Suspensão.

O objetivo principal desta parte do estudo foi testar a utilização do amostrador de sedimentos para a determinação do perfil de concentrações e assim, estabelecer as mudanças que nele possam ocorrer em função do incremento da concentração de sedimentos total do fluxo, bem como estabelecer correlações com o perfil de velocidades.

a) **Testes preliminares do amostrador de sedimentos:** a verificação do correto funcionamento do mecanismo de sifonamento do escoamento em contato com tubo coletor

para a garrafa de amostras foi testado com água limpa. Devido à pequena espessura do escoamento sobre o canal, foram escolhidos três pontos de medição de concentração para o fluxo com declividade 5% e dois pontos de medição para fluxos com declividade 8,7%.

- b) **Testes de medição dos perfis de concentração com diferentes concentrações de sedimentos em suspensão:** foram levantados os perfis de concentração em escoamentos de uma mistura de água e materiais grosso e fino (areia fina, areia muito fina e silte e argila). As concentrações de sedimento foram incrementadas sistematicamente, a fim de observar o efeito do aumento da concentração de sedimento em suspensão sobre o perfil de concentração (tabela 4.6).

Tabela 4.6. Resumo dos testes de medição do perfil de concentrações para escoamento com sedimento em suspensão.

Tipo de solos testados	3	Brunizém Vertico, Terra roxa e Vertissolo
Declividades testadas para cada tipo de solo	2	5% e 8,7%
Número de pontos de medição de concentração	2 para (*) 3 para (**)	(*) Para declividade 8,7% (**) Para declividade 5%
Número de concentrações testadas para cada tipo de solo	2 para (*) 3 para (**)	(*) Brunizém Vértico (**) Terra Roxa e Vetissolo variando na faixa de $C_v = 0,5$ até 8%
Número de repetições	1	Foram realizados uma única medida de concentração em cada ponto

Detalhes do processo de medição do perfil de concentração podem ser encontrados no anexo E.

5. RESULTADOS

5.1. Considerações Gerais

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos diferentes experimentos concebidos para atingir os objetivos dessa pesquisa. Por motivos de simplificação, os solos empregados nos testes são citados pelas suas iniciais: Brunizém Vértico (Bv), Terra Roxa (Tr) e Vertissolo (V); as declividades trabalhadas são 5% e 8,7%. Os resultados são apresentados seguindo a sequência tratada na metodologia: propriedades dos sedimentos, propriedades reológicas, velocidade de queda dos sedimentos grossos em um fluido em repouso com material fino em suspensão, estudo do perfil de velocidade e estudo do perfil de concentração em fluxos com sedimento em suspensão. A apresentação de cada item consistirá de uma exposição e análise dos resultados para cada tipo de solo de forma individual e de forma conjunta.

5.2. Propriedades dos Sedimentos

Seguindo a metodologia apresentada no item 4.3, são aqui apresentados os resultados da análise das propriedades do sedimento para os solos Tr, Bv e V. As porcentagens de material grosso e material fino para cada tipo de solo são apresentadas na Tabela 5.1. A fração de material grosso da amostra é aquela cujos diâmetros são maiores que 0,053 mm e a fração fina é aquela com diâmetros menores de 0,053 mm.

Tabela 5.1. Porcentagem de material grosso e fino para cada tipo de solo

Tipo de Solo	Bv	Tr	V
Peso amostra seca total [g]	1322,45	1408,38	1008,99
Peso amostra seca: material grosso [gr]	926,44	220,52	118,27
Peso da amostra seca: material fino [gr]	396,01	1187,86	890,72
% do peso amostra grossa	70,05	15,66	11,72
% do peso amostra fina	29,95	84,34	88,28

Da tabela 5.1 observa-se que os solos Tr e V possuem uma alta taxa de material fino enquanto que o solo Bv trata-se de um solo arenoso.

As frações de material grosso de cada tipo de solo foram analisadas a fim de estabelecer sua composição quanto à presença das classes de areia: média, fina e muito fina (tabela 5.2).

Deve-se aclarar que o uso do termo “areia” não significa que se este referendo à composição mineral de areia (quartzo), mas sim no sentido da classificação, segundo a faixa de abrangência de diâmetros de sedimentos. Entendendo-se que os sedimentos obtidos da peneiração úmida (solo Bv e Tr) ou seca (solo Bv) estão compostos por areia e agregados.

Tabela 5.2. Peso e porcentagem parcial das classes areia média, areia fina e areia muito fina para cada tipo de solo

Tipo de Solo	Bv	Tr	V
Peso total da amostra [g]	133,26	120,72	98,98
Peso areia média [g]	30,50	27,31	14,70
Peso da areia fina [g]	60,74	50,19	35,57
Peso da areia muito fina [g]	38,10	28,82	41,20
% do peso areia média	22,89	22,62	14,85
% do peso areia fina	45,58	41,58	35,94
% do peso da areia muito fina	28,59	23,87	41,62
% do peso da areia fina mais areia muito fina	74,17	65,45	77,56
% do peso das três classes usadas	97,06	88,07	92,41

O termo “peso total da amostra” da tabela 5.2, refere-se ao peso total da amostra do solo, inclui-se as classes: areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina.

Observa-se que nas amostras dos três tipos de solos as classes de areia média, areia fina e areia muito fina representam uma porcentagem importante do peso total do material grosso, sendo o valor mais alto o observado no solo Bv, isto era de esperar devido à sua característica predominantemente arenosa.

A figura 5.1 apresenta um gráfico comparativo das diferentes curvas granulométricas de material grosso, afim de observar melhor as diferenças entre esses três tipos de solos.

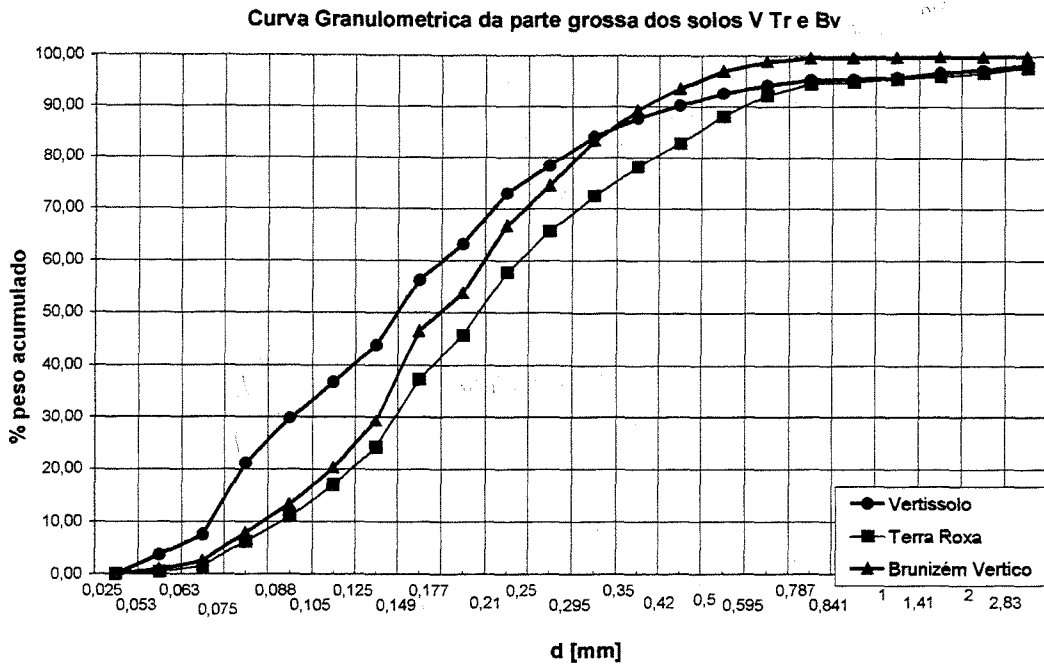


Figura 5.1. Curvas granulométricas do material grosso para os solos Bv, Tr e V.

Observa-se que o Vertissolo apresenta o menor diâmetro médio $d_{50}=0,149\text{mm}$, aproximadamente, o solo Bv apresentou um valor de diâmetro médio $d_{50}=0,177\text{mm}$ e o solo Tr possui $d_{50}=0,20\text{mm}$, aproximadamente, sendo o maior diâmetro médio.

As frações finas de cada tipo de solo também foram analisadas com o intento de avaliar a presença de argila em cada amostra, uma vez que é este o fator que mais afeta a mudança das propriedades físicas do fluido de mistura água+sedimento e, por consequência, de seu comportamento reológico (tabela 5.3).

Tabela 5.3. Peso parcial e porcentagem de peso de silte e argila para cada tipo de solo

Tipo de Solo	Bv	Tr	V
Peso total da amostra de material fino[g]	11,04	16,15	13,07
Peso silte [g]	6,98	4,19	5,46
Peso de argila [g]	4,06	11,96	7,61
Peso do sedimento $d>0,01\text{mm}$ [g]	4,59	2,22	3,32
% do peso de silte	63,22	25,94	41,78
% do peso de argila	36,78	74,06	58,22
% do peso de $d> 0,01\text{mm}$	41,58	13,75	25,40
% do peso de $d< 0,01\text{mm}$	58,42	86,25	74,60

Observa-se que os solos Tr e V possuem mais de 50% do peso da fração fina ($<0,053\text{mm}$) correspondente à fração de argila, sendo que os valores mais altos correspondem

ao solo Tr de natureza caulínica. O solo V, de natureza expansiva, apresenta em torno de 58% de fração argila. Observa-se também que o valor mais baixo de fração argila é apresentado para o solo Bv, coincidindo com sua natureza siltosa do material fino.

Na tabela 5.3 também são observados os valores correspondentes a $d < 0,01$ mm, os quais representam a porcentagem de material fino sob o ponto de vista dos estudos em Engenharia de Sedimentos realizados na China. Esses valores foram determinados tendo em vista a comparação dos resultados obtidos em estudos similares encontrados, com muita ênfase, na literatura desse país.

A figura 5.2 apresenta um gráfico comparativo das curvas granulométricas da parte fina dos solos em estudo. A característica siltosa do solo Bv é mais evidente neste gráfico.

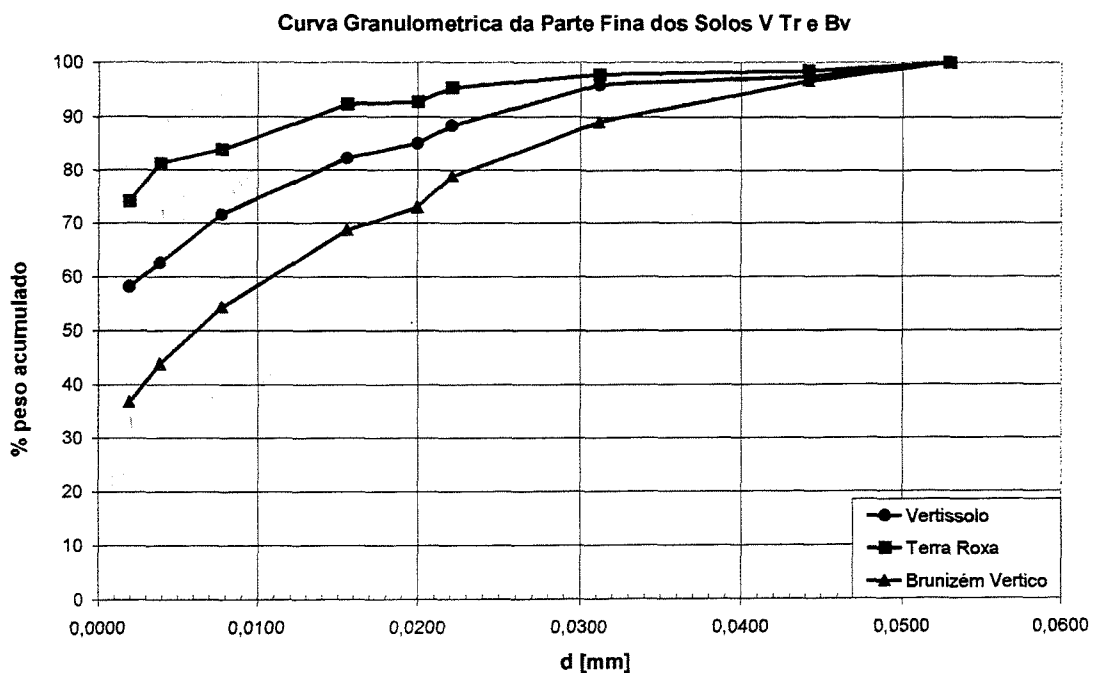


Figura 5.2. Curvas Granulométricas do material fino (silte e argila) para os solos Bv, Tr e V.

A tabela 5.4 mostra as massas específicas das diferentes classes que compõem os solos analisados: Areia Média (AM), Areia Fina (AF), Areia Muito Fina (AMF) e Silte/Argila (SA). É também apresentada a mineralogia predominante em cada classe e o valor esperado da massa específica. Estes valores foram obtidos empregando o método do picnômetro e serão utilizados nas experiências do Tubo de Griffith para a determinação da velocidade de queda.

Tabela 5.4. Massas específicas do material fino e material grosso por classes, para os solos Bv, Tr e V

Tipo Solo	Classe	Massa específica [gr/cm ³]	Mineral dominante *	Massa específica esperada [gr/cm ³]
Bv	AM	2,64	Quartzo	≈2,65
Bv	AF	2,67	Quartzo	≈2,65
Bv	AMF	2,70	Quartzo	≈2,65
Bv	SA	2,47	Esmectita, quartzo e mica e caulinita	<2,65
Tr	AM	2,92	Quartzo, hematita	>2,65
Tr	AF	2,90	Quartzo, hematita	>2,65
Tr	AMF	3,03	Quartzo, hematita	>2,65
Tr	SA	2,65	Caolinita	≈2,65
V	AM	2,39	Quartzo, feldspatos	<2,65
V	AF	2,42	Quartzo, feldspatos	<2,65
V	AMF	2,49	Quartzo, feldspatos	<2,65
V	SA	2,25	Esmectita	<2,65

* Fonte: mineralogia dos solos Bv e V foi obtida por Albuquerque (1998) e Tr de Carvalho *et al* (1988).

Apesar das limitações do método adotado (método do picnômetro) não é recomendado para material muito fino, Carvalho (1994), os resultados obtidos de massa específica para SA se mostraram satisfatórios.

5.3. Propriedades Reológicas

5.3.1. Testes de Tixotropia e Reopexia

As amostras selecionadas foram submetidas a testes de Reopexia ou Tixotropia. Lembrando que o viscosímetro foi programado para imprimir leituras da porcentagem de torque aplicado no cilindro concêntrico interno e da sua velocidade de rotação. A análise dos resultados consistiu em verificar se existia mudanças nos valores da porcentagem do torque referente a uma velocidade angular constante aplicada por um lapso de 25 minutos.

Os solos tipos Tr e V não apresentaram mudanças no valor de torque após os 25 minutos; entretanto, para o solo Bv observou-se mudanças nos valores do torque. Também pôde-se observar que, para o solo Bv, uma vez finalizado o teste e retirada a amostra do

cilindro concêntrico externo, ocorreu a deposição de uma fina camada no fundo desse cilindro. Este fenômeno foi observado em menor grau nas amostras dos solos Tr e V. Para concentrações volumétricas (C_v) do solo Bv maiores de 2%, os resultados impressos apresentaram leituras de torque acima da faixa limite (100%) do funcionamento do viscosímetro, motivo pelo qual não foi possível realizar experimentos acima de $C_v=1,26\%$. Este comportamento é atribuído à alta taxa de silte dentro do material fino do Bv, o que provoca uma rápida decantação do material em suspensão no fundo do cilindro externo e gera um pseudo comportamento de Reopexia.

5.3.2. Tratamentos de dados do viscosímetro

Com os dados coletados com o uso do viscosímetro serão estabelecidos os reogramas dos solos ensaiados.

Equações para construção dos reogramas no viscosímetro de cilindros concêntricos

O comportamento reológico envolve a relação entre taxa de deformação angular e tensão cisalhante. A equação fundamental que expressa essa relação é a seguinte:

$$D_s = f(\tau) \quad (5.1)$$

onde a taxa de deformação angular, D_s , relaciona-se com a tensão cisalhante τ por meio da função reológica $f(\tau)$.

Em um viscosímetro cilíndrico coaxial, o fluido permanece entre a folga de dois cilindros: um interno e outro externo. O primeiro permanece fixo e o segundo é ligado a um motor que permite seu giro com uma velocidade angular qualquer, gerando um torque M (figura 4.1). A tensão de cisalhamento na parede externa do cilindro interno é dada por

$$\tau_{a'} = \frac{M}{2\pi a'^2 h'} \quad (5.2)$$

onde a' e h' são o raio e a altura do cilindro interno, respectivamente.

A velocidade angular Ω é relacionada à tensão de cisalhamento, $\tau_{a'}$, pela equação

seguinte:

$$\frac{2s^2}{s^2-1} \Omega = \frac{s^2}{s^2-1} \int_{s^{-2}\tau_{a'}}^{\tau_{a'}} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau = D_s \quad (5.3)$$

no qual $s=b'/a'$, b' é o raio do cilindro externo.

Para um fluido Newtoniano temos que a função reológica é :

$$f(\tau) = \frac{\tau}{\mu} \quad (5.4)$$

então aplicando 5.4 em 5.3, e após integrar tem-se:

$$\frac{s^2}{s^2-1} \int_{s^{-2}\tau_{a'}}^{\tau_{a'}} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau = \frac{s^2}{s^2-1} \int_{s^{-2}\tau_{a'}}^{\tau_{a'}} \frac{1}{\mu} d\tau = \frac{s^2}{s^2-1} \frac{(\tau_{a'} - \tau_{a'}s^{-2})}{\mu} = \frac{\tau_{a'}}{\mu} = D_s \quad (5.5)$$

no caso de um fluido não newtoniano do tipo Bingham temos que a função reológica é:

$$f(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{para } \tau \leq \tau_b \\ \frac{1}{\eta}(\tau - \tau_b) & \text{para } \tau > \tau_b \end{cases} \quad (5.6)$$

Integrando a equação 5.3 obtém-se que a taxa de deformação angular é:

$$D_s = \left[\begin{array}{l} 0, \tau_{a'} \leq \tau_b \\ \frac{s^2}{s^2-1} \frac{1}{\eta} \left[\tau_{a'} - \tau_b - \tau_b \ln \frac{\tau_{a'}}{\tau_b} \right], s^{-2}\tau_{a'} < \tau_b \leq \tau_{a'} \\ \frac{1}{\eta} [\tau_{a'} - \tau_b], s^{-2}\tau_{a'} > \tau_b \end{array} \right] \quad (5.7)$$

O valor de τ_b é a tensão de escoamento determinada mediante a interseção da reta do reograma no eixo das tensões cisalhantes. Entretanto, experimentos feitos por Wang et al (1994) demonstraram um pequeno desvio dos valores experimentais da linha reta perto do ponto de interseção, sugerindo que a verdadeira tensão de escoamento τ_w pode ser determinada por:

$$\tau_w = \left(\frac{2s^2}{s^2 - 1} \ln s \right)^{-1} \tau_b \quad (5.8)$$

No caso de fluido pseudo-plástico dilatante temos que

$$\log \tau_a = n \log D_s + \log \left[K \left(\frac{s^2 - 1}{s^{2/n} - 1} \frac{s^{2/n}}{ns^2} \right) \right] \quad (5.9)$$

Os valores K e n são obtidos das interseções das linhas sobre o eixo dos τ_a .

O cálculo da viscosidade cinemática ν é feita da seguinte forma:

a) Para fluido Newtoniano temos:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_m} \quad (5.10.a)$$

onde ρ_m é a densidade da mistura (equação 3.14) e μ é a viscosidade dinâmica.

b) Para fluido não newtoniano tipo Bingham temos:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_m} \quad (5.10.b)$$

onde η é a viscosidade plástica.

5.3.3. Reogramas

A construção dos reogramas consistiu na aplicação das equações mostradas no item anterior aos resultados impressos de porcentagem de torque e velocidade angular de rotação. Os reogramas expressam a variação da tensão cisalhante em função da taxa de deformação angular para mistura água com material fino em suspensão para as amostras dos solos Bv, Tr e V, os quais são apresentados a seguir:

- Solo Brunizém Vértico (Bv)

A tabela 5.5 apresenta os resultados dos reogramas do solo Bv. Foram realizados um total de 3 testes repetidos denominados a, b e c para uma concentração volumétrica $C_v=1,26$ %. Cada um dos dados dos testes repetitivos foram analisados de forma separada (a, b e c) e conjunta (a+b+c), determinando-se os seus parâmetros reológicos mediante um ajuste linear

entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação angular. Em todos os testes notou-se um comportamento de fluido Bingham. Os parâmetros mostrados nas colunas da tabela 5.5 são: a tensão de escoamento (τ_b) que é produto da intercepção da reta do reograma sobre o eixo da tensão cisalhante (ordenadas); a tensão de escoamento corrigida segundo Wang et al (1994) (τ_w); as viscosidades dinâmica plástica (η) e cinemática (ν); a temperatura (T) e o coeficiente de correlação do ajuste linear (R^2).

Tabela 5.5. Resumo dos resultados das amostras do solo Bv

Cv [%]	Teste Repetitivos	τ_b [dina/cm ²]	τ_w [dina/cm ²]	η [dina.s/cm ²]	η [N.s/m ²]	ν [m ² /s]	T °C	R ²
1,26	a	0,1961	0,1788	0,0187	0,00187	1,877E-06	27,5	0,9556
	b	0,3058	0,2789	0,0160	0,00160	1,605E-06	27	0,9139
	c	0,2421	0,2208	0,0169	0,00169	1,696E-06	27,5	0,9413
Total	(a+b+c)	0,248	0,2262	0,0172	0,00172	1,726E-06	27,3	0,9297

Qual quer método para determinação numérica de grandezas físicas está sujeita a erros. Se forem feitas repetidas observações de uma ou dada grandeza, verifica-se que o valor obtido variará de uma observação a outra. Tal flutuação é, geralmente, atribuída à presença de erros de observação.

Admite-se que antes de qualquer análise de erro estatístico é necessário uma análise preliminar para descartar erros grosseiros devido a manipulação, ao equipamento, ao cômputo numérico, etc.

- Análise Preliminar de Erros

a) Análise preliminar comparativa: Esta análise objetiva identificar erros grosseiros comparando um ao outro os resultados dos parâmetros reológicos para cada teste repetitivo (tabela 5.6.a). Observa-se que os valores de tensão de escoamento não são muito próximos, apresentando um erro relativo absoluto entre cada teste maior que 20%. A viscosidade plástica apresenta um valor máximo de erro relativo absoluto inferior a 15%, o que sugere retas com declividades e pontos de interseção diferentes.

Tabela 5.6.a. Erros relativos dos parâmetros reológicos entre os diferentes testes para $C_v=1,26$ do solo Bv.

Cv=1,26		
Erro relativo entre os testes repetitivos:	Erro relativo da Tensão de Escoamento $(\tau_{bj} - \tau_{bi}) / \tau_{bi} \cdot 100$ [%]	Erro relativo da viscosidade plástica $(\eta_j - \eta_i) / \eta_i \cdot 100$ [%]
i=a e j=b	55,94	-14,44
i=a e j=c	23,46	-9,63
i=b e j=c	-20,83	5,62

b) Análise de erros devido ao equipamento: Destaque-se que o fabricante informa que o erro de leitura dos valores de torque aplicado (%) pelo viscosímetro é de 1%, isto é, para valores menores que 10 % o erro de leitura do torque representa mais da décima parte do valor lido. Para descartar essas possíveis fontes de erro do equipamento empregado, construiu-se a tabela 5.6.b que resume os valores da taxa de deformação angular e os valores de torques maiores e menores que 10 % para o total dos testes repetitivos (a+b+c). Desta tabela resume conclui-se que só o valor de $D_s=24,51$ apresenta valores menores que 10% sendo os demais valores dos torques maiores que 10 %. Então, a hipótese de erro causado pela leitura do equipamento é descartada.

Tabela 5.6.b. Deformação angular e % torque maiores ou menores que 10% para solo Bv

Cv=1,26%	
Ds [1/s]	% torque
24,51	<10%
36,8	>10%
42,9	>10%
49	>10%
55,2	>10%
61,3	>10%
73,5	>10%
85,8	>10%

torno de $\pm 2,84\%$ do valor da tensão cisalhante média calculada.

-Reograma do solo Bv

O gráfico 5.3.a mostra o reograma correspondente à totalidade de dados obtidos nos três testes repetitivos para solo Brunizém Vértico.

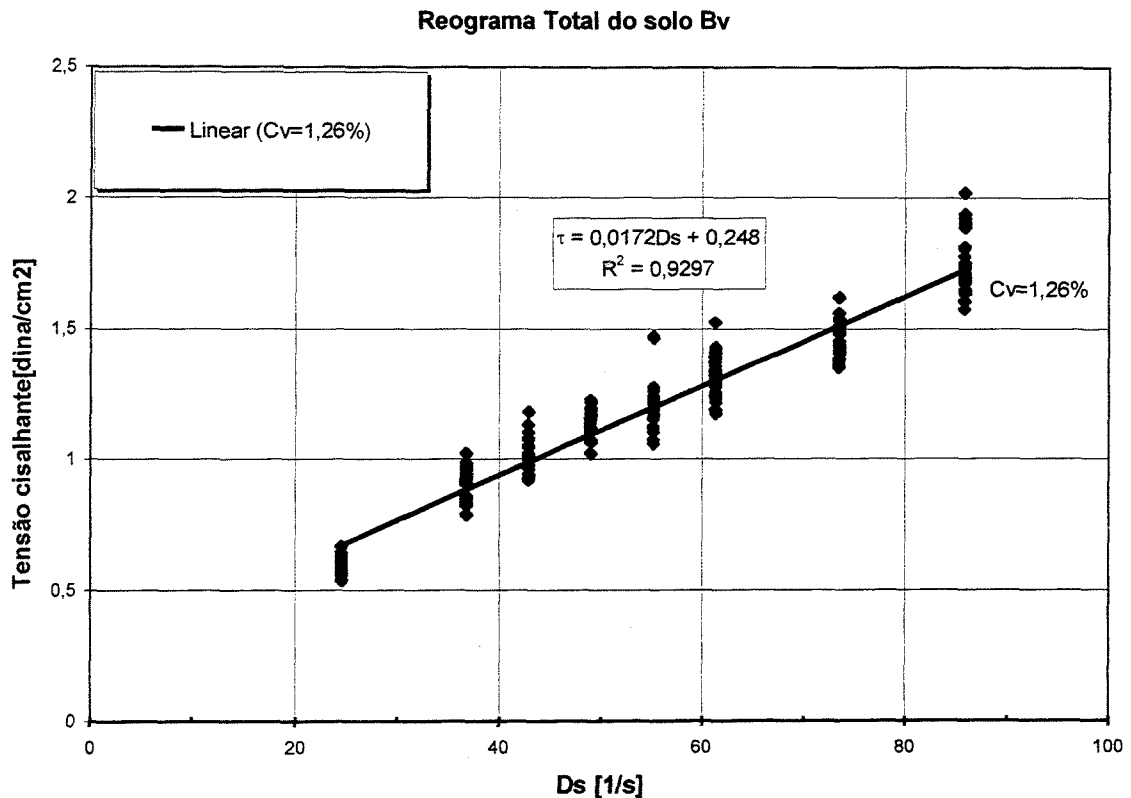


Figura 5.3.a. Reograma do solo Bv ($C_v=1,26\%$ e $T=27,3\text{ }^\circ\text{C}$)

Apesar de ser um valor baixo de concentração volumétrica, pode-se observar na figura 5.3.a um possível comportamento não newtoniano. Menciona-se possível devido à característica siltosa do solo, pois esse comportamento pode ser o resultado da ação do material precipitado, localizado entre a folga existente entre os dois cilindros, que cria um atrito facilmente confundido com a tensão de escoamento τ_b . A continuação é realizada uma análise de resíduos da equação de ajuste.

- Análise de Resíduos

A análise de resíduos determinará o grau de acompanhamento da equação de ajuste

escolhida. Isto é feito mediante o cálculo do erro de estimação ou resíduo, equação 5.10, obtido entre o valor médio calculado e o valor estimado pela equação de ajuste aplicada.

$$\text{Resíduo} = \frac{(\tau_{\text{médio calculado}} - \tau_{\text{estimado}})}{\tau_{\text{médio calculado}}} \times 100 \quad (5.14)$$

O critério da análise é fundamentada na suposição que um ajuste adequado gerará erros com uma distribuição normal e cuja média é zero.

Na tabela 5.7 são apresentados os valores da taxa de deformação D_s , a tensão média calculada, os intervalos de confiança, a tensão estimada, identificação de conformidade dos valores da tensão estimada com os intervalos de confiança respectivos e os resíduos.

Tabela 5.7. Resumo da análise de resíduos do solo Bv para $C_v=1,26\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio}}$ [dina/cm ²]	Intervalo de confiança de $\tau_{\text{médio calculado}}$		τ_{estimado} [dina/cm ²]	Valor de τ_{estimado} dentro de intervalo de confiança	Resíduos [%]
		$\tau_{\text{Valor inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]			
24,52	0,590	0,573	0,607	0,670	Não	-13,51
36,77	0,912	0,888	0,935	0,881	Não	3,41
42,90	1,009	0,981	1,037	0,986	Sim	2,30
49,03	1,146	1,125	1,168	1,091	Não	4,80
55,16	1,191	1,161	1,221	1,197	Sim	-0,49
61,29	1,316	1,288	1,344	1,302	Sim	1,06
73,55	1,457	1,435	1,479	1,513	Não	-3,84
85,81	1,741	1,702	1,779	1,724	Sim	0,97
					média	-0,66

Na tabela 5.7, na coluna denominada “Valor de τ_{estimado} dentro de intervalo de confiança”, pode-se observar que a metade dos valores de tensão cisalhante estimada está fora da faixa de intervalo de confiança. Isto significa que a equação linear escolhida apresenta problemas no ajuste. Ademais, é observado uma maior presença de valores de resíduo positivos.

Para uma melhor visualização dos resultados mostrados na tabela 5.7, é construído um gráfico composto pela taxa de deformação D_s , e pelos resíduos correspondentes (figura 5.3.b).

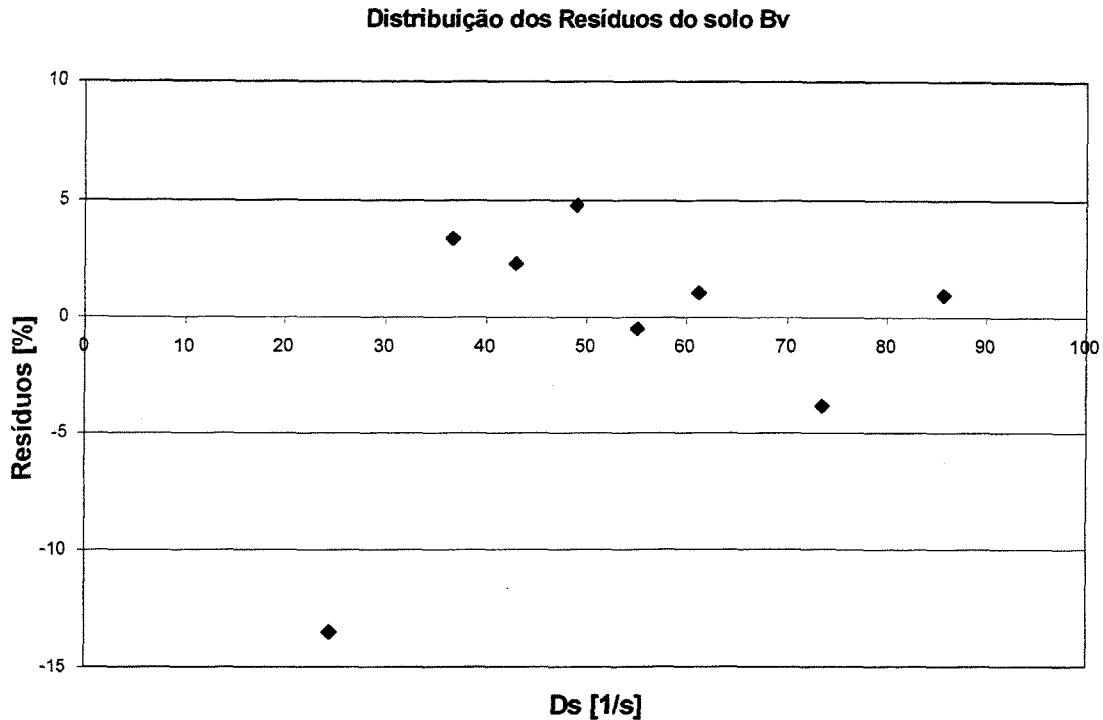


Figura 5.3.b. Distribuição dos resíduos para o solo Bv ($C_v=1,26\%$ e $T=27,3\text{ }^\circ\text{C}$)

Uma análise conjunta da figura 5.3.b e da tabela 5.7, permite confirmar que a equação de ajuste apresenta uma leve tendência a subestimar os valores da tensão cisalhante (predominância de erros positivos), apesar de que a média de erros seja negativa (média=-0,66). Este valor é devido ao valor $D_s=24,62$ com Resíduo=-13,51%, tendo um fator de compensação com os valores positivos.

- Solo Terra roxa (Tr)

As tabelas 5.8.a e 5.8.b apresentam os resultados dos reogramas do solo Tr, obtidos em um total de 3 testes repetitivos (a, b e c) para as concentrações volumétricas $C_v=2,74$ e $C_v=5,96$ e dois testes (a e b) para $C_v=0,94\%$. Os dados de cada um dos testes repetidos, para cada concentração, foram analisados de forma separada e conjunta, determinando-se os seus parâmetros reológicos mediante um ajuste linear entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação angular. Observou-se para todas as formas de análise das amostras com $C_v=5,96$ um comportamento não newtoniano do tipo Bingham (tabela 5.6.a). No caso das amostras com concentrações volumétricas de $C_v=2,74$ e $0,94$; os parâmetros reológicos calculados mostrados um comportamento newtoniano (tabela 5.8.b).

Tabela 5.8.a. Resumo das amostras do solo Tr (Cv=5,96 %)

Cv [%]	Teste Repetitivos	τ_b [dina/cm ²]	τ_w [dina/cm ²]	η [dina.s/cm ²]	η [N.s/m ²]	ν [m ² /s]	T °C	R ²
5,96	a	0,3069	0,2799	0,0203	0,00203	1,856E-06	27	0,9836
	b	0,2320	0,2115	0,0217	0,00217	1,979E-06	26,8	0,9864
	c	0,2380	0,2170	0,0203	0,00203	1,855E-06	26,6	0,9942
Total	(a+b+c)	0,2590	0,2362	0,0208	0,00208	1,899E-06	26,8	0,9768

Tabela 5.8.b. Resumo das amostras do solo Tr (Cv=2,74 % e Cv=0,94 %)

Cv [%]	Teste Repetitivos	μ [dina.s/cm ²]	μ [N.s/m ²]	ν [m ² /s]	T °C	R ²
2,74	a	0,0141	0,00141	1,351E-06	26,5	0,9239
	b	0,0141	0,00141	1,355E-06	26,3	0,9583
	c	0,0137	0,00137	1,311E-06	26	0,8825
Total	(a+b+c)	0,0139	0,00139	1,395E-06	26,3	0,9256
0,94	a	0,0107	0,00107	1,062E-06	26,1	0,9382
	b	0,0116	0,00116	1,144E-06	25,8	0,9554
Total	(a+b)	0,0112	0,00112	1,124E-06	26,2	0,9218

- Análise Preliminar de Erros

a) *Análise preliminar comparativa:* Comparando entre si os resultados individuais de cada teste repetitivo para cada concentração volumétrica, observa-se que os valores das viscosidades (plástica e newtoniana) são muito próximos (tabela 5.9.a). Isto sugere que a declividade dos reogramas para cada teste repetitivo foi quase a mesma. No caso da tensão de escoamento das amostras com Cv=5,96 %, os valores dos testes b e c se encontraram próximos (erro < 3%), porém comparando o teste a com os testes b e c, observa-se valores entre a faixa de 2% até 24 %. Pode-se concluir que não existe resultados discrepantes entre os diferentes testes repetitivos.

Tabela 5.9.a. Erros relativos dos parâmetros reológicos entre os diferentes testes para $C_v=5,96, 2,74$ e $0,94$ do solo Tr

	$C_v=5,96$		$C_v=2,74$	$C_v=0,94$
Erro relativo entre os testes repetitivos:	Erro relativo Da Tensão de Escoamento $(\tau_{bj} - \tau_{bi}) / \tau_{bi} \cdot 100$ [%]	Erro relativo da viscosidade plástica $(\eta_j - \eta_i) / \eta_i \cdot 100$ [%]	Erro relativo a viscosidade $(\mu_j - \mu_i) / \mu_i \cdot 100$ [%]	Erro relativo a viscosidade $(\mu_j - \mu_i) / \mu_i \cdot 100$ [%]
i=a e j=b	-24,42	6,63	0,33	7,72
i=a e j=c	-22,45	-0,01	-2,92	-
i=b e j=c	2,61	-6,23	-3,23	-

b) Análise de erros devido a equipamento: A análise do erro devido a leitura de equipamento mostra que os valores do torque para as diferentes taxas de deformação para $C_v=5,96$ são, na sua totalidade, maiores que 10% (tabela 5.9.b), o que descarta erro devido ao equipamento empregado.

Tabela 5.9.b. Resumo Ds e % de torque maior e menor que 10% para solo Tr

Ds [1/s]	$C_v=5,96\%$ % torque	$C_v=2,72\%$ % torque	$C_v=0,94\%$ % torque
24,51	>10%	<10%	<10%
36,8	>10%	<10%	<10%
42,9	>10%	<10%	<10%
49	>10%	>10%	<10%
55,2	>10%	>10%	<10%
61,3	>10%	>10%	>10%
73,5	>10%	>10%	>10%
85,8	>10%	>10%	-

c) Erros metodológicos de manipulação: Diferentemente do ocorrido com o solo Bv, não foi observado, em nenhum dos testes correspondentes às concentrações $C_v=0,94\%$ e $C_v=2,74\%$, a formação de uma camada fina de material sedimentado no fundo do cilindro externo do viscosímetro. No caso da concentração $C_v=5,96\%$ observou-se uma leve formação da dita camada, mas não tão acentuada como a que foi observada no solo Bv ($C_v=1,26\%$). Descarta-se, então, os possíveis erros de manipulação. Finalizada a análise preliminar é realizada a continuação da análise de erros aleatórios.

- *Análise de Erros aleatórios*

Nas tabelas 5.9.c., 5.9.d e 5.9.e são mostrados os valores de taxa de deformação D_s , tensão cisalhante média calculada, Desvio Padrão, fator I, a expressão E, o número de dados (n) empregados para o cálculo de cada tensão cisalhante, e valores do intervalo de confiança inferior e superior, respectivamente.

Tabela 5.9.c. Resumo da análise do intervalo de confiança, 95 % de probabilidade, do solo Tr para $C_v=0,94\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio_calculado}}$ [dina/cm ²]	Desvio Padrão [dina/cm ²]	I [dina/cm ²]	E [%]	n	Intervalo de confiança de $\tau_{\text{médio_calculado}}$	
						$\tau_{\text{Valor inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]
36,77	0,420	0,0161	0,011126	2,65	8	0,409	0,431
42,90	0,484	0,0159	0,007768	1,60	16	0,477	0,492
49,03	0,550	0,0212	0,010378	1,89	16	0,540	0,560
55,16	0,618	0,0310	0,015213	2,46	16	0,603	0,633
61,29	0,667	0,0375	0,015684	2,35	22	0,651	0,682
73,55	0,829	0,0671	0,028051	3,38	22	0,801	0,857

Os valores do termo E, tabela 5.9.c, oscilam entre 1,6% ao 3,38%, para 95% de probabilidade. São valores baixos, o que origina intervalo de confiança estreito, confirmando que os testes repetitivos realizados foram congruentes.

Tabela 5.9.d. Resumo da análise do intervalo de confiança, 95% de probabilidade, do solo Tr para $Cv=2,74\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio_calculado}}$ [dina/cm ²]	Desvio Padrão [dina/cm ²]	I [dina/cm ²]	E [%]	n	Intervalo de confiança de $\tau_{\text{médio_calculado}}$	
						$\tau_{\text{Valor inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]
						36,77	0,565
42,90	0,620	0,0363	0,015	2,34	24	0,606	0,635
49,03	0,697	0,0439	0,018	2,52	24	0,679	0,714
55,16	0,772	0,0629	0,025	3,26	24	0,747	0,797
61,29	0,857	0,0291	0,010	1,16	33	0,847	0,867
73,55	1,012	0,0535	0,018	1,80	33	0,994	1,030
85,81	1,176	0,0731	0,031	2,60	22	1,145	1,206

Os valores do termo E (tabela 5.9.d) oscilam entre 1,16% ao 6,80%, para 95% de probabilidade. Deve-se observar que o máximo valor de E é de 6,80% e corresponde ao primeiro da coluna. Este valor pode ser descartado ou não. Neste estudo, optou-se por não descartar este valor. Os demais valores de E são menores que 3,26%. Estes resultados confirmam que os testes repetitivos realizados foram congruentes.

Tabela 5.9.e. Resumo da análise do intervalo de confiança, 95% de probabilidade, do solo Tr para $Cv=5,96\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio_calculado}}$ [dina/cm ²]	Desvio Padrão [dina/cm ²]	I [dina/cm ²]	E [%]	n	Intervalo de confiança de $\tau_{\text{médio_calculado}}$	
						$\tau_{\text{Valor inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]
						36,77	0,998
42,90	1,163	0,0377	0,015	1,30	24	1,148	1,178
49,03	1,292	0,0529	0,021	1,64	24	1,271	1,313
55,16	1,428	0,0697	0,028	1,95	24	1,400	1,456
61,29	1,519	0,0377	0,013	0,85	33	1,506	1,532
73,55	1,785	0,0499	0,017	0,95	33	1,768	1,802
85,81	2,037	0,0559	0,019	0,94	33	2,018	2,056

Os valores de E, tabela 5.9.e, oscilam entre 0,85% até 1,95%, para 95 % de probabilidade. São valores muito baixos, o que confirma que os testes repetitivos realizados foram congruentes.

- Reograma do solo Tr

O gráfico 5.4.a mostra os reogramas correspondentes à totalidade de dados obtidos nos testes repetitivos para $C_v=5,96\%$, $C_v=2,74$ e $C_v=0,94\%$ do solo Terra Roxa.

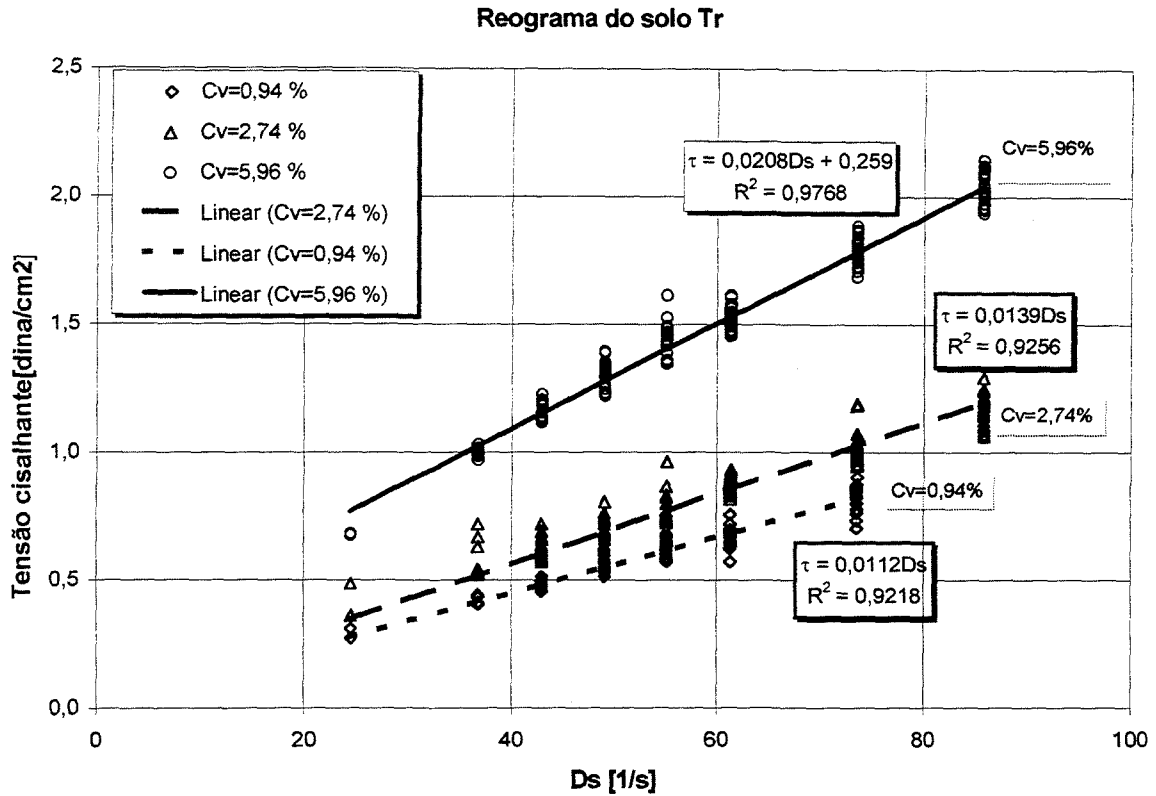


Figura 5.4.a. Reograma do solo Tr ($C_v=5,96\%$, $C_v=2,74$ e $C_v=0,94\%$).

Dos valores das tabelas 5.8.a e 5.8.b e dos reogramas da figura 5.4.a, observa-se que o sedimento em suspensão não mudou o comportamento newtoniano do fluido com $C_v=0,94$ e $2,74$ mas causou um aumento da viscosidade com o aumento da concentração. Para $C_v=5,96\%$ o comportamento observado é de não newtoniano, apresentando um comportamento do tipo plástico ou Bingham. A continuação é realizada uma análise de resíduos das equações de ajuste.

- *Análise de Resíduos*

Na tabela 5.10.a, 5.10.b e 5.10.c são apresentados os valores da taxa de deformação D_s , a tensão média calculada, intervalos de confiança, tensão estimada, uma coluna identificando se os valores da tensão estimada estão dentro dos intervalos de confiança respectivos, e valores

dos resíduos.

Na tabela 5.10.a é observado que a maioria dos valores da tensão cisalhante estimada está dentro dos intervalos de confiança. Isto confirma que existe um bom ajuste da equação escolhida. O valor do resíduo médio é próximo a zero, o que confirma que os erros são aleatórios.

Tabela 5.10.a. Resumo da análise de resíduos do solo Tr para $C_v=0,94\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio}}$ [dina/cm ²]	Intervalo de confiança de $\tau_{\text{médio_calculado}}$		τ_{estimado} [dina/cm ²]	Valor de τ_{estimado} dentro de intervalo de confiança	Resíduos [%]
		$\tau_{\text{Valor inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]			
36,77	0,420	0,409	0,431	0,412	Sim	1,97
42,90	0,484	0,477	0,492	0,481	Sim	0,80
49,03	0,550	0,540	0,560	0,549	Sim	0,15
55,16	0,618	0,603	0,633	0,618	Sim	0,01
61,29	0,667	0,651	0,682	0,686	Não	-2,99
73,55	0,829	0,801	0,857	0,824	Sim	0,63
Média						0,10

Na tabela 5.10.b também pode-se observar que a maioria dos valores da tensão cisalhante estimada está dentro dos intervalos de confiança, o que novamente confirma uma boa predição da equação ajuste. Deve-se notar que os valores que ficaram fora do intervalo de confiança expressam valores muito próximos aos limites do mesmo. O valor da média do resíduo é alto, 2,05 (>0), isto se deve ao fato de que os dois primeiros valores da coluna são porcentagem relativamente altas, afetando a média.

Tabela 5.10.b. Resumo da análise de resíduos do solo Tr para $C_v=2,74\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio}}$ [dina/cm ²]	Intervalo de confiança de		τ_{estimado} [dina/cm ²]	Valor de τ_{estimado} dentro de intervalo de confiança	Resíduos [%]
		de $\tau_{\text{médio_calculado}}$				
		$\tau_{\text{Valor inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]			
36,77	0,565	0,527	0,604	0,511	Não	9,55
42,90	0,620	0,606	0,635	0,596	Não	3,84
49,03	0,697	0,679	0,714	0,682	Sim	2,16
55,16	0,772	0,747	0,797	0,767	Sim	0,70
61,29	0,857	0,847	0,867	0,852	Sim	0,58
73,55	1,012	0,994	1,030	1,022	Sim	-1,03
85,81	1,176	1,145	1,206	1,193	Sim	-1,46
				Média		2,05

Na tabela 5.10.c é observado que a maioria dos valores da tensão cisalhante estimada está dentro dos intervalos de confiança, o que confirma uma boa predição da equação de ajuste. Deve-se notar que os valores que ficaram fora do intervalo de confiança expressam valores muito próximos aos limites dos intervalo de confiança. O valor da média dos resíduos é próximo a zero, confirmando a boa predição da equação de ajuste escolhida.

Tabela 5.10.c. Resumo da análise da resíduos do solo Tr para $C_v=5,96\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio}}$ [dina/cm ²]	Intervalo de confiança		τ_{estimado} [dina/cm ²]	Valor de τ_{estimado} dentro de intervalo de confiança	Resíduos [%]
		de $\tau_{\text{médio_calculado}}$				
		$\tau_{\text{Valor inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]			
36,77	0,998	0,989	1,006	1,024	Não	-2,65
42,90	1,163	1,148	1,178	1,151	Sim	1,02
49,03	1,292	1,271	1,313	1,279	Sim	1,02
55,16	1,428	1,400	1,456	1,406	Sim	1,50
61,29	1,519	1,506	1,532	1,534	Não	-0,99
73,55	1,785	1,768	1,802	1,789	Sim	-0,23
85,81	2,037	2,018	2,056	2,044	Sim	-0,31
				Média		-0,09

Para expressar de forma gráfica o observado nas tabelas de acima, foi construída a figura 5.4.b.

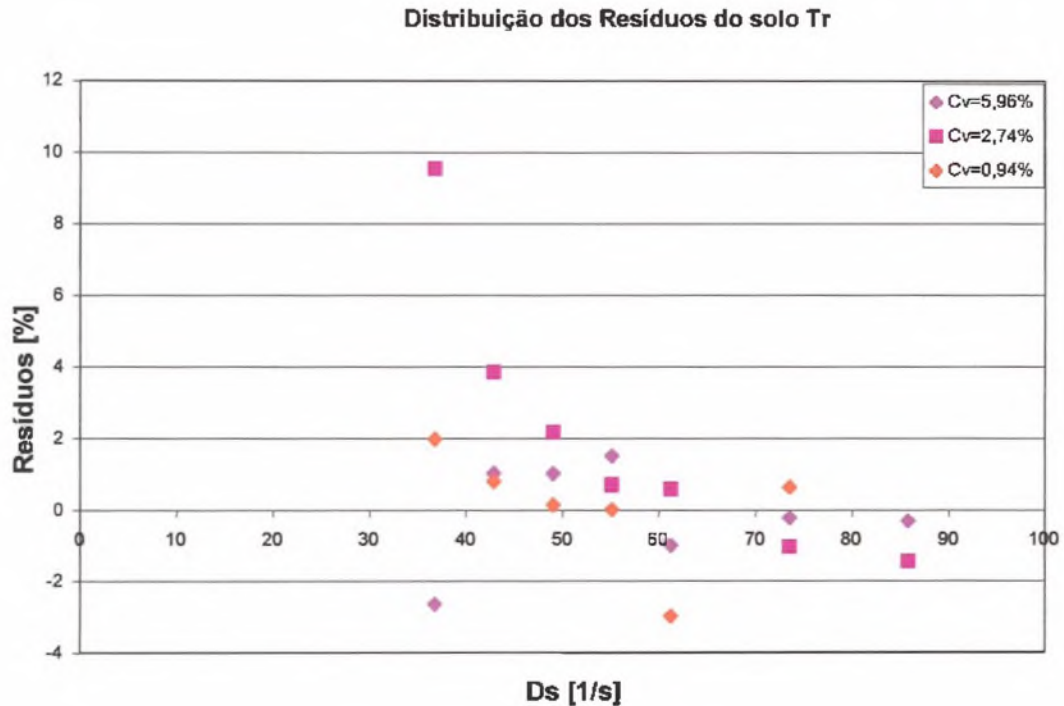


Figura 5.4.b. Distribuição dos resíduos para o solo Tr ($C_v=5,96\%$, $C_v=2,74\%$ e $C_v=0,94\%$).

Uma análise conjunta das tabelas 5.10.a, 5.10.b e 5.10.c com a figura 5.4.b, mostra que os valores dos resíduos da amostra $C_v=2,74\%$ apresentam uma tendenciosidade e não guardam um comportamento aleatório, concluindo que não existe uma boa predição por parte da equação de ajuste escolhida, apesar de que os valores estimados pela equação de ajuste estejam, na sua maioria, dentro do intervalo de confiança.

- Solo Vertissolo (V)

As tabelas 5.11.a e 5.11.b apresentam os resultados dos reogramas do solo V. Foram um total de quatro testes repetitivos (a, b, c e d) para a concentração $C_v=7,07\%$; três testes repetitivos para a concentração volumétrica $C_v=3,72\%$ e dois testes (a e b) para $C_v=1,42\%$. Os dados de cada um dos testes repetitivos para cada concentração foram analisados de forma separada e conjunta, determinando-se o seus parâmetros reológicos mediante um ajuste linear entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação angular. Os testes com $C_v=7,07\%$ apresentaram um comportamento de fluido Bingham (tabela 5.11a). Nas concentrações $C_v=1,42\%$ e $C_v=3,72\%$, todas as formas de análise mostraram um comportamento newtoniano (tabela 5.11b).

Tabela 5.11.a. Resumo do solo V ($C_v=7,07\%$)

Cv [%]	Teste Repetitivo	τ_b [dina/cm ²]	τ_w [dina/cm ²]	μ [dina.s/cm ²]	μ [N.s/m ²]	ν [m ² /s]	T °C	R ²
7,07	a	1,4909	1,3596	0,0396	0,00396	3,649E-06	25,4	0,9917
	b	1,3946	1,2717	0,0393	0,00393	3,622E-06	26,1	0,983
	c	1,1041	1,0068	0,0396	0,00396	3,650E-06	26,8	0,9883
	d	1,0093	0,9204	0,0407	0,00407	3,751E-06	26,8	0,9918
Total	(a+b+c+d)	1,2497	1,1396	0,0402	0,00402	4,033E-06	26,3	0,9541

Tabela 5.11.b. Resumo do solo V ($C_v=3,72\%$ e $C_v=1,42\%$)

Cv [%]	Teste Repetitivo	μ [dina.s/cm ²]	μ [N.s/m ²]	ν [m ² /s]	T °C	R ²
3,72	a	0,0195	0,00195	1,870E-06	27,2	0,9894
	b	0,0190	0,00190	1,821E-06	26,3	0,9688
	c	0,0185	0,00185	1,773E-06	26	0,9551
Total	(a+b+c)	0,0190	0,00190	1,906E-06	26,5	0,9652
1,42	a	0,0121	0,00121	1,193E-06	26,2	0,9596
	b	0,0130	0,00130	1,281E-06	26	0,9398
Total	(a+b)	0,0126	0,00126	1,242E-06	26,1	0,9348

- Análise preliminar de Erros

a) *Análise preliminar comparativa:* Os valores da tensão de escoamento para cada teste repetitivo da concentração $C_v=7,07\%$ são diferentes (valores absolutos do erro variando de 32,30% a 6,46%), ao contrário da viscosidade plástica que apresentou valores próximos com erros menores a 4% (tabela 5.12.a). Pode-se concluir que esses valores retratam retas paralelas, mas com diferente pontos de interseção com o eixo y.

Para o caso das amostras correspondentes às concentrações $C_v=1,42\%$ e $C_v=3,72\%$, os valores absolutos dos erros variam na faixa de 2,56% a 7,44% (tabela 5.12.a), valores muito próximos o que corresponderia a retas com quase a mesma declividade.

Tabela 5.12.a. Erros relativos dos parâmetros reológicos entre os diferentes testes do solo V
(Cv=7,07%, 3,72% e 1,42%)

	Cv=7,07%		Cv=3,72%	Cv=1,42%
Erro relativo entre os testes repetitivos	Erro relativo da Tensão de Escoamento $(\tau_{bj}-\tau_{bi})/\tau_{bi} \cdot 100$ [%]	Erro relativo da viscosidade plástica $(\eta_j-\eta_i)/\eta_i \cdot 100$ [%]	Erro relativo a viscosidade $(\mu_j-\mu_i)/\mu_i \cdot 100$ [%]	Erro relativo a viscosidade $(\mu_j-\mu_i)/\mu_i \cdot 100$ [%]
i=a e j=b	-6,46	-0,76	-2,56	7,44
i=a e j=c	-25,94	0,00	-5,13	-
i=a e j=d	-32,30	2,78	-	-
i=b e j=c	-20,83	0,76	-2,63	-
i=b e j=d	-27,63	3,56	-	-
i=c e j=d	-8,59	2,78	-	-

b) Análise de erros devido a equipamento: Da tabela 5.12.b pode-se concluir que o erro de leitura do equipamento deve ser descartado como uma possível causa das margens de erro dos valores de tensão de escoamento para Cv=7,07% pois todas as leituras de torque foram superiores a 10%.

Tabela 5.12.b. Resumo Ds e % de torque maior e menor que 10% para solo V

Ds [1/s]	Cv=7,07% % torque	Cv=3,72% % torque	Cv=1,42% % torque
3,06	>10%	-	-
6,12	>10%	-	-
12,2	>10%	-	-
24,51	>10%	<10%	<10%
36,8	>10%	>10%	<10%
42,9	>10%	>10%	<10%
49	>10%	>10%	>10%
55,2	>10%	>10%	>10%
61,3	>10%	>10%	>10%
73,5	>10%	>10%	>10%
85,8	>10%	>10%	-

c) *Erros metodológicos de manipulação*: Diferentemente do solo Bv, não foi observado, em nenhum dos testes correspondentes as concentrações $C_v=1,42\%$ e $C_v=3,72\%$, a formação de uma camada fina de material sedimentado no fundo do cilindro externo do viscosímetro. No caso da concentração $C_v=7,07\%$ observou-se uma leve formação de dita camada, mas não tão acentuada como a que foi observada no solo Bv ($C_v=1,26\%$). Descarta-se, então, os possíveis erros de manipulação.

Finalizada a análise preliminar, é realizada a continuação da análise de erros aleatórios.

- *Análise de Erros aleatórios*

As tabelas 5.12.c, 5.13.d e 5.13.e mostra os valores da taxa de deformação D_s , a tensão cisalhante média calculada, o Desvio Padrão, o fator I, a expressão E, o número de dados n empregados para o cálculo de cada tensão cisalhante, e os valores do intervalo de confiança inferior e superior, respectivamente.

Tabela 5.12.c. Resumo da análise do intervalo de confiança do solo V para $C_v=1,42\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio_calculado}}$ [dina/cm ²]	Desvio Padrão [dina/cm ²]	I [dina/cm ²]	E [%]	n	Intervalo de confiança de $\tau_{\text{médio_calculado}}$	
						$\tau_{\text{Valor inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]
24,52	0,300	0,0141	0,007	2,46	14	0,292	0,307
36,77	0,472	0,0452	0,022	4,69	16	0,450	0,494
42,90	0,529	0,0293	0,014	2,72	16	0,515	0,544
49,03	0,639	0,0636	0,031	4,88	16	0,607	0,670
55,16	0,699	0,0308	0,013	1,84	22	0,686	0,711
61,29	0,792	0,0515	0,022	2,72	22	0,771	0,814
73,55	0,887	0,0486	0,020	2,29	22	0,867	0,908
85,81	1,082	0,1094	0,046	4,22	22	1,036	1,128

Os valores do termo E são baixos (tabela 5.12.c) oscilando entre 1,84% até 4,69%, confirmando que os testes repetitivos mantiveram quase o mesmo comportamento.

Tabela 5.12.d. Resumo da análise do intervalo de confiança do solo V para $C_v=3,72\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio_calculado}}$ [dina/cm ²]	Desvio Padrão [dina/cm ²]	I [dina/cm ²]	E [%]	n	Intervalo de confiança de $\tau_{\text{médio_calculado}}$	
						$\tau_{\text{Valor Inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]
24,52	0,505	0,0423	0,021	4,11	16	0,484	0,525
36,77	0,726	0,0529	0,023	3,12	21	0,703	0,749
42,90	0,844	0,0610	0,024	2,89	24	0,819	0,868
49,03	0,939	0,0429	0,017	1,83	24	0,922	0,956
55,16	1,069	0,0447	0,016	1,50	30	1,053	1,085
61,29	1,171	0,0557	0,019	1,62	33	1,152	1,190
73,55	1,364	0,0502	0,017	1,25	33	1,347	1,381
85,81	1,616	0,0840	0,029	1,77	33	1,588	1,645

Observa-se que os valores de E (tabela 5.12.d) são baixos, oscilando entre 1,25% até 4,11%, confirmando que os testes repetitivos tiveram quase o mesmo comportamento.

Tabela 5.12.e. Resumo da análise do intervalo de confiança do solo V para $C_v=7,07\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio_calculado}}$ [dina/cm ²]	Desvio Padrão [dina/cm ²]	I [dina/cm ²]	E [%]	n	Intervalo de confiança de $\tau_{\text{médio_calculado}}$	
						$\tau_{\text{Valor Inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]
6,13	1,352	0,1988	0,080	5,88	24	1,272	1,431
12,26	1,734	0,1794	0,056	3,21	40	1,678	1,789
24,52	2,309	0,1845	0,055	2,36	44	2,255	2,364
36,77	2,821	0,1917	0,084	2,98	20	2,737	2,905
49,03	3,268	0,2025	0,057	1,75	48	3,211	3,325
55,16	3,516	0,1837	0,052	1,48	48	3,464	3,568
61,29	3,724	0,1573	0,044	1,19	48	3,679	3,768
73,55	4,087	0,1601	0,045	1,11	48	4,042	4,133

Observa-se que os valores de E são baixos (tabela 5.12.e), oscilando entre 1,11% até 5,88%, confirmando que os testes repetitivos tiveram quase o mesmo comportamento. Apesar de o valor da primeira linha da coluna E ser relativamente alto.

-Reograma do solo V

O gráfico 5.5.a mostra os reogramas correspondentes à totalidade de dados obtidos nos testes repetitivos para $C_v=1,42$; $C_v=3,72\%$ e $C_v=7,07\%$.

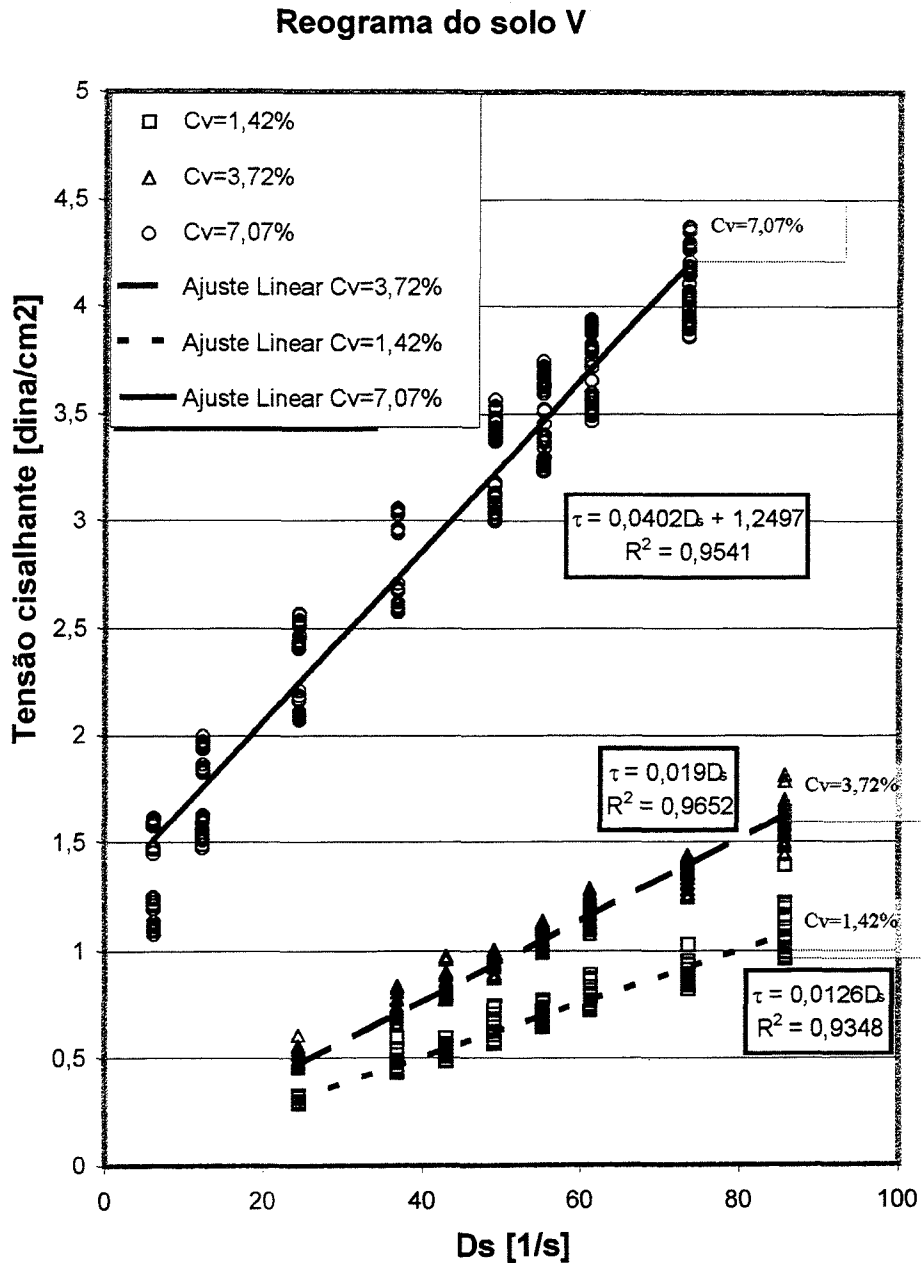


Figura 5.5.a. Reogramas do solo V ($C_v=1,42$; $C_v=3,72\%$ e $C_v=7,07\%$).

Dos valores da tabela 5.11.a e 5.11.b e da figura 5.5.a, observa-se a mudança de um comportamento newtoniano ($C_v=1,42\%$ e $C_v=3,72\%$) para não newtoniano (tipo Bingham, para $C_v=7,07\%$) com o aumento da concentração, assim como um aumento da viscosidade com o aumento a concentração.

- Análise de Resíduos

Nas tabelas 5.13.a, 5.13.b e 5.13.c são apresentados valores da taxa de deformação D_s , tensão média calculada, intervalos de confiança, tensão estimada, uma coluna identificando se os valores da tensão estimada estão dentro dos intervalos de confiança respectivos, e valores dos resíduos.

Tabela 5.13.a. Resumo da análise de resíduos do solo V para $C_v=1,42\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio}}$ [dina/cm ²]	Intervalo de confiança de $\tau_{\text{médio_calculado}}$		τ_{estimado} [dina/cm ²]	Valor de τ_{estimado} dentro de intervalo de confiança	Resíduos [%]
		$\tau_{\text{Valor inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]			
24,52	0,300	0,292	0,307	0,309	Não	-3,02
36,77	0,472	0,450	0,494	0,463	Sim	1,83
42,90	0,529	0,515	0,544	0,541	Sim	-2,12
49,03	0,639	0,607	0,670	0,618	Sim	3,24
55,16	0,699	0,686	0,711	0,695	Sim	0,50
61,29	0,792	0,771	0,814	0,772	Sim	2,53
73,55	0,887	0,867	0,908	0,927	Não	-4,43
85,81	1,082	1,036	1,128	1,081	Sim	0,06
					Média	-0,18

Observa-se na tabela 5.13.a, que a maioria dos valores estimados pela equação de ajuste se encontram dentro do intervalo de confiança respectivo. No caso dos resíduos, a média apresenta um valor próximo a zero confirmando o comportamento aleatório dos mesmos.

Tabela 5.13.b. Resumo da análise de resíduos do solo V para $C_v=3,72\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio}}$ [dina/cm ²]	Intervalo de confiança de $\tau_{\text{médio_calculado}}$		τ_{estimado} [dina/cm ²]	Valor de τ_{estimado} dentro de intervalo de confiança	Resíduos [%]
		$\tau_{\text{Valor Inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]			
24,52	0,505	0,484	0,525	0,466	Não	7,68
36,77	0,726	0,703	0,749	0,699	Não	3,74
42,90	0,844	0,819	0,868	0,815	Não	3,38
49,03	0,939	0,922	0,956	0,932	Sim	0,77
55,16	1,069	1,053	1,085	1,048	Não	1,94
61,29	1,171	1,152	1,190	1,165	Sim	0,55
73,55	1,364	1,347	1,381	1,397	Não	-2,45
85,81	1,616	1,588	1,645	1,630	Sim	-0,88
					Média	1,84

Na tabela 5.13.b se observa que nem todos os valores de tensão cisalhante estimados pela equação de ajuste se encontram dentro do intervalo de confiança respectivo. No caso dos resíduos, observa-se que a equação de ajuste aplicada apresenta uma tendência a subestimar os valores da tensão cisalhante calculada. Isto pode ser confirmado também pela média dos resíduos que é maior que zero.

Tabela 5.13.c. Resumo da análise de resíduos do solo V para $C_v=7,07\%$.

Ds [1/s]	$\tau_{\text{médio}}$ [dina/cm ²]	Intervalo de confiança de $\tau_{\text{médio_calculado}}$		τ_{estimado} [dina/cm ²]	Valor de τ_{estimado} dentro de intervalo de confiança	Resíduos [%]
		$\tau_{\text{Valor Inferior}}$ [dina/cm ²]	$\tau_{\text{Valor superior}}$ [dina/cm ²]			
6,13	1,352	1,272	1,431	1,496	Não	-10,69
12,26	1,734	1,678	1,789	1,742	Sim	-0,51
24,52	2,309	2,255	2,364	2,235	Não	3,21
36,77	2,821	2,737	2,905	2,728	Sim	3,29
49,03	3,268	3,211	3,325	3,221	Sim	1,44
55,16	3,516	3,464	3,568	3,467	Sim	1,40
61,29	3,724	3,679	3,768	3,714	Sim	0,27
73,55	4,087	4,042	4,133	4,206	Não	-2,91
					Média	-0,56

Na tabela 5.13.c se observa que a maioria dos valores estimados pela equação de ajuste

se encontram dentro do intervalo de confiança da tensão cisalhante média calculada. No caso dos resíduos, observa-se que a equação de ajuste aplicada apresenta uma tendência a subestimar os valores de tensão cisalhante calculados. O valor negativo da média dos resíduos é devido à influência do primeiro valor $-10,69\%$.

Para uma melhor análise dos resíduos, é construído um gráfico, 5.5.b, entre D_s e seus respectivos resíduos obtidos.

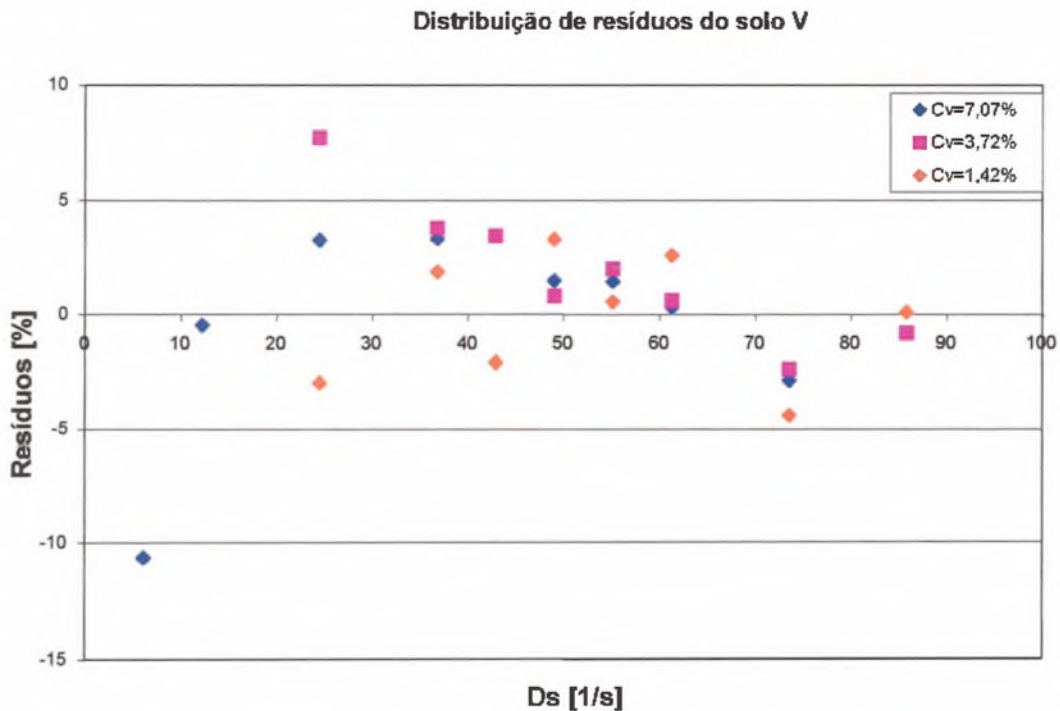


Figura 5.5.b. Distribuição de resíduos do solo V ($C_v=1,42$; $C_v=3,72\%$ e $C_v=7,07\%$).

Uma análise conjunta das tabelas 5.13.a, 5.13.b e 5.13.c com a figura 5.5.b, mostra que os resíduos da amostra com $C_v=3,72\%$ apresenta uma tendência, o que contradiz o comportamento aleatório esperado. Isto sugere que a equação de ajuste aplicada não esteja descrevendo de forma adequada os valores calculados de tensão cisalhante.

Apesar de que para os solos Tr e V ter sido constatado que o comportamento reológico de certas amostras ($C_v=2,72\%$ para solo Tr e $C_v=3,72\%$ para solo V) não serem descritos de forma adequada pela equação de ajuste linear aplicada em cada uma delas, optou-se por manter o ajuste linear, pelo fato de que este tipo de equação de ajuste teve bom desempenho nas aplicações em outras amostras de ambos os solos e poder facilitar cálculos futuros de interpolação e análise comparativa.

-Comparação entre os comportamentos reológicos dos solos analisados

Foi elaborada uma tabela comparativa do efeito da concentração sobre a viscosidade, a fim de observar as diferenças quantitativas entre os dois tipos de solo Tr e V. Não foi possível incluir nesta análise o solo Bv, pois só se possui um único dado de viscosidade e concentração.

Tabela 5.14. Variação da viscosidade relativa com a concentração volumétrica para solos Tr e V

Solo Tr		Solo V	
μ/μ_{H_2O}	Cv [%]	μ/μ_{H_2O}	Cv [%]
2,03236	5,96	3,96	7,07
2,16712	5,96	3,93	7,07
2,03219	5,96	3,96	7,07
1,40761	2,74	4,07	7,07
1,41223	2,74	1,95	3,72
1,36655	2,74	1,9	3,72
1,07494	0,94	1,85	3,72
1,15788	0,94	1,21	1,42
1	0,00	1,3	1,42
		1	0,00

Os valores da viscosidade dinâmica μ foram adimensionalizados com referência a viscosidade da água limpa μ_{H_2O} ($T=20^\circ\text{C}$). Os valores da concentração foram expressas em % de concentração volumétrica.

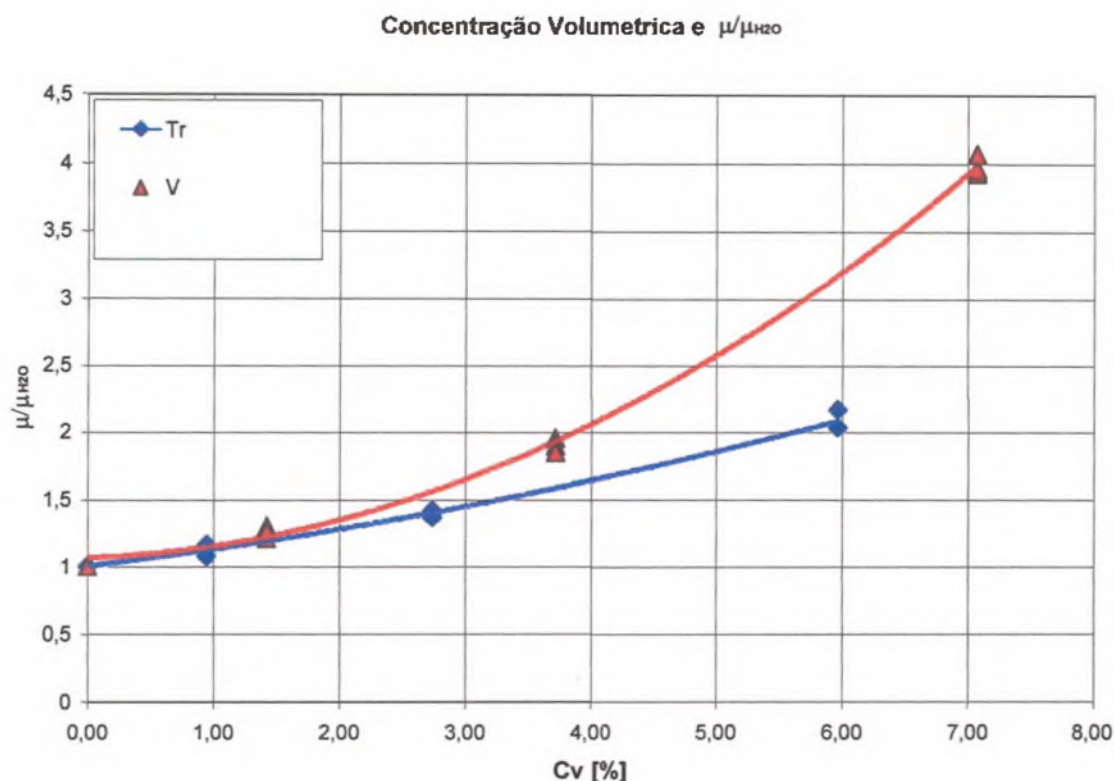


Figura 5.6. Curvas comparativas da variação da viscosidade com a concentração volumétrica para os solo Tr e V

Da figura 5.6 pode-se observar que o efeito do aumento da concentração sobre o valor da viscosidade é mais forte no solo V, do tipo Esmectítico, que no solo Tr, do tipo Caulinitico. Este mesmo resultado foi observado por Karen (1988), quando analisou o efeito da composição mineral nas propriedades reológicas em testes comparativos de misturas de caolinita e Montmorilonita, observando o forte efeito deste último sobre os parâmetros reológicos, tensão de escoamento e viscosidade. Uma explicação a este fenômeno é a propriedade expansiva dos solos esmectíticos, onde minerais como a montmorilonita são capazes de capturar moléculas de água e integrá-las dentro da sua estrutura cristalina. Dita propriedade aumentaria a resistência intermolecular do fluido de mistura água-sedimento fino gerando um aumento da viscosidade.

Como comentário final, pode-se observar que o número de testes repetitivos foi de dois a quatro. Esta restrição deveu-se à problemas de ordem técnica, pois não se contava, na época da realização destes testes, com um ambiente acondicionado que permitisse o controle da temperatura, impedindo a realização de mais testes repetitivos. Por tal motivo, foi realizada uma média de três testes por dia. Ademais, deve-se comentar que antes destes testes definitivos foi realizada uma série de testes pilotos com a finalidade de definir a metodologia mais adequada.

5.4. Determinação da Velocidade de Queda dos Sedimentos Grossos em um Fluido Estagnado com Material Fino em Suspensão

Apresentam-se aqui os resultados referentes ao cálculo das velocidades de queda de material grosso (classes areia média, areia fina e areia muito fina) em um fluido em repouso com água limpa e com uma mistura de água com material fino em suspensão. Deve-se destacar que quando são analisadas diferentes classes de areias, inclui-se nestas classes agregados e areias. Numa primeira etapa são apresentados os testes comparativos dos dois sistemas de admissão de sedimentos (automático e manual). Logo após, são apresentados os testes referentes à quantidade de material grosso empregados em cada teste. Os resultados dos três tipos de solos estudados são apresentados em forma individual.

5.4.1. Tempo de cada teste

A tabela 5.15. apresenta o tempo total empregado em cada teste, cuja determinação é feita a partir do tempo que o menor diâmetro presente na classe em estudo leva para completar o percurso de 2 m do tubo de decantação (a velocidade de queda empregada no cálculo é obtida pela equação de Concharov apud Cheng (1997)), como foi explicado no capítulo da metodologia do item 4.6 (b), cujo cálculo considera como fluido de repouso água limpa (20°C) e o material grosso são partículas de sílica de forma esférica, $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$. A última coluna da tabela apresenta os resultados do tempo total de cada teste mais o incremento de dez minutos, que representa um tempo de espera de segurança para verificar possíveis problemas de vazamentos. O tempo total calculado também serve como base para o cálculo do tempo dos testes de velocidade de queda do material grosso em fluido de mistura água com sedimento fino.

Tabela 5.15. Tempo total empregado para cada teste

Classe	Intervalo [mm]	Menor diâmetro da classe [mm]	Tempo total de teste		Tempo total de teste + 10 min de segurança	
			[min]	[s]	[min]	[s]
Areia Média	<0,5 a 0.25>	0,25	1	55	11	55
Areia Fina	<0,25 a 0.125>	0,125	4	45	14	45
Areia Muito Fina	<0,125 a 0.053>	0,053	26	23	36	23

5.4.2. Processo de cálculo da velocidade de queda

A seguir é apresentado o processo de cálculo da velocidade de queda; como mencionado no item 4.3.1, a amostra total do material grosso colocado dentro do tubo ficará distribuída nas bandejas ou recipientes de coleta. É realizada a pesagem do material em cada bandeja e construída uma coluna com as porcentagens dos pesos acumulados “menor que”. De maneira similar, foi construída uma coluna com as velocidades de queda para cada porcentagem de peso acumulado “menor que” (Tabela 5.16). O cálculo da velocidade de queda média para uma classe em estudo será determinada mediante a projeção do valor de 50% da porcentagem do peso acumulado “menor que” sobre o eixo da velocidade de queda. Como exemplo, (Figura 5.7), ao valor de 50% (eixo de porcentagem de peso “menor que”) é corresponde-se o valor de velocidade 1,03 cm/s.

Tabela 5.16. Exemplo do processo de cálculo da velocidade queda, areia muito fina para solo Bv em água limpa a 19 °C

Bandeja	Tempo		Peso amostra [g]	Peso acumulado	% peso acumulado	% peso acumulado menor que	Velocidade de queda [cm/s]
	min	s					
1	0	40					
2	1	20					
3	2	0	0,22	0,22	4,63	95,36	1,67
4	2	40	1,11	1,33	28,00	72	1,25
5	3	20	1,2	2,53	53,26	46,73	1,00
6	4	0	0,78	3,31	69,68	30,31	0,83
7	4	40	0,55	3,86	81,26	18,73	0,71
8	5	20	0,38	4,24	89,26	10,73	0,63
9	6	0	0,51	4,75	100	0	0,56
10	6	40					

Curva % peso "menor que" versus velocidade de queda para AMF do solo Bv em água limpa, T: 19 °C

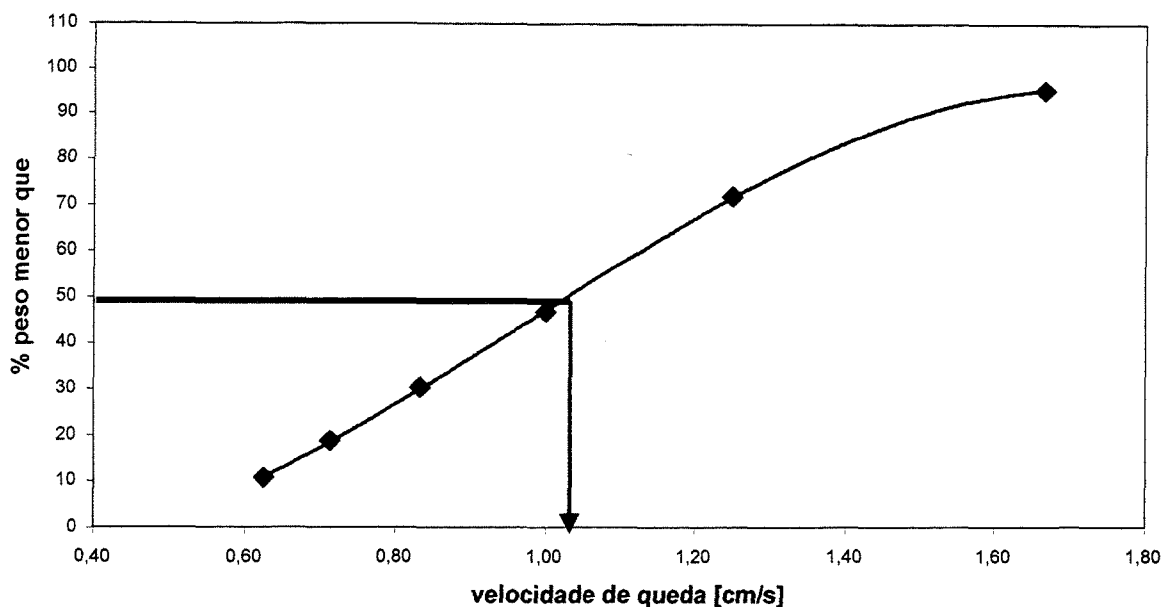


Figura 5.7. Exemplo de determinação da velocidade de queda média.

Por razões práticas, o cálculo do valor da velocidade de queda média é feita por uma interpolação simples entre os valores superior e inferior mais próximos à 50%. Também deve-se mencionar que daqui em diante a velocidade de queda média é chamada de velocidade de queda.

5.4.3. Resultados comparativos entre o sistema automático e manual de admissão da amostra.

Nos primeiros testes de velocidade de queda para água limpa com o sistema automático de admissão da amostra, observou-se uma forte aceleração do sedimento no instante do contato com a água, por este motivo procurou-se diminuir este impacto mediante um novo sistema manual. Para esta parte comparativa foram empregados os solos Bv e Tr, sendo que nos testes repetitivos correspondentes ao Bv, empregou-se areia média e areia fina. No caso do Tr, foi empregada apenas a classe areia média para os testes repetitivos.

A figura 5.8 mostra as médias das velocidades de queda dos testes repetitivos correspondentes à areia média e fina dos solo Bv para ambos sistemas de admissão.

Comparação das velocidades de queda obtidas no Tubo de Griffith com os sistemas de admissão de sedimento automático e manual para Areia Média e Fina do solo Bv

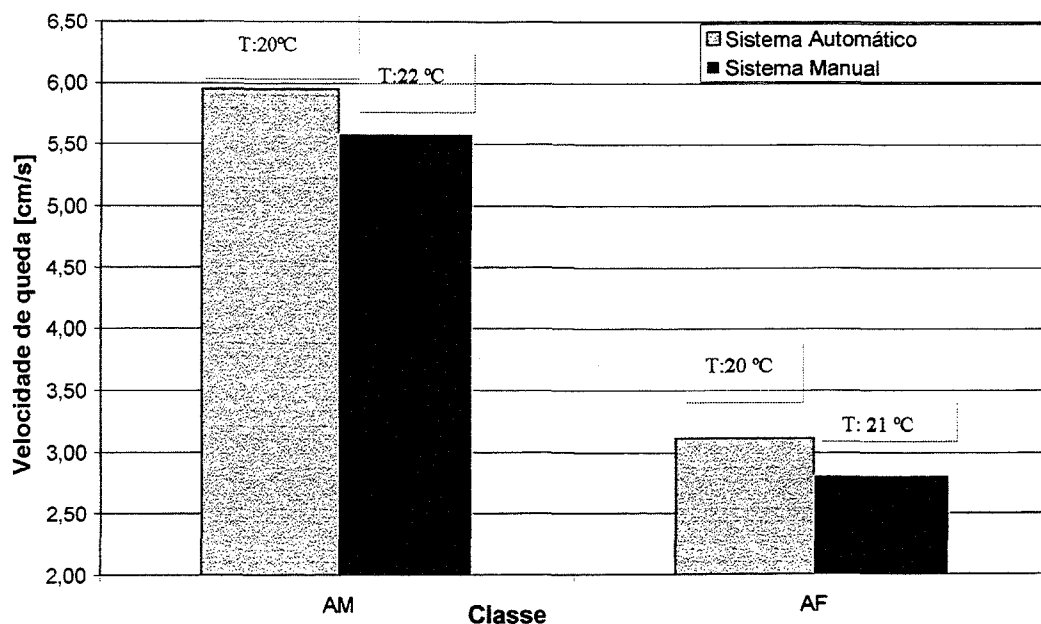


Figura 5.8. Gráfico comparativo entre os dois tipos de sistemas de entrada testados para areia média para solo Bv.

Observa-se que, com referência ao sistema de admissão automático, o sistema manual apresenta uma diminuição da velocidade de queda.

A figura 5.9 mostra os valores da velocidade de queda dos testes repetitivos correspondentes aos dois sistemas em estudo para o solo Tr.

Comparação das velocidades de queda obtidas no Tubo de Griffith com os sistemas de admissão de sedimento automático e manual para Areia Média do solo Tr

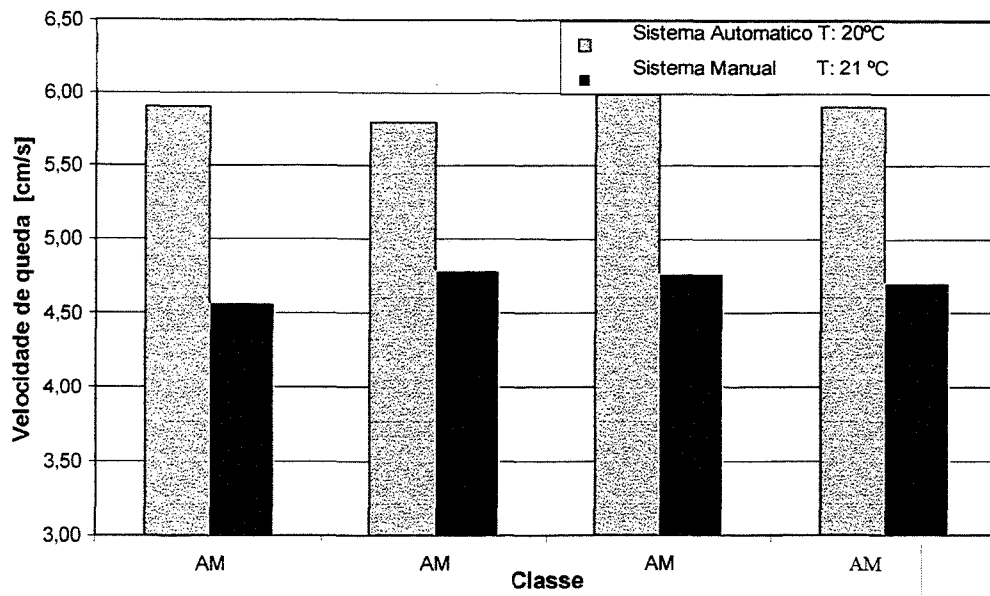


Figura 5.9. Gráfico comparativo entre os dois tipos de sistemas de entrada testados para areia média para solo Tr.

Novamente, observa-se que as velocidade de queda no sistema manual de admissão apresentam valores menores aos obtidos no sistema automático.

Destes dois gráficos, conclui-se que o sistema de entrada manual apresenta um melhor resultado. Deve-se mencionar que esta melhora quantitativa também foi comprovada de forma qualitativa, observou-se visualmente uma diminuição do impacto do sedimento no instante de contato com a água, permitindo reduzir a aceleração de entrada do material grosso nos primeiros 30 cm do percurso no tubo de acrílico.

5.4.4. Resultados da escolha da quantidade padrão de sedimento grosso a se empregar.

Como foi mencionado no item 4.6.c, esse teste teve como finalidade avaliar a quantidade de sedimento por amostra a ser utilizada em cada teste. Para isso, realizou-se uma gama de testes repetitivos com um grupo de amostras de diferentes quantidades (2,5; 5 e 10 g) de areia fina do solo Bv.

Da figura 5.10 observa-se que os valores das médias de velocidade de queda para cada quantidade de amostra testada não diferem muito.

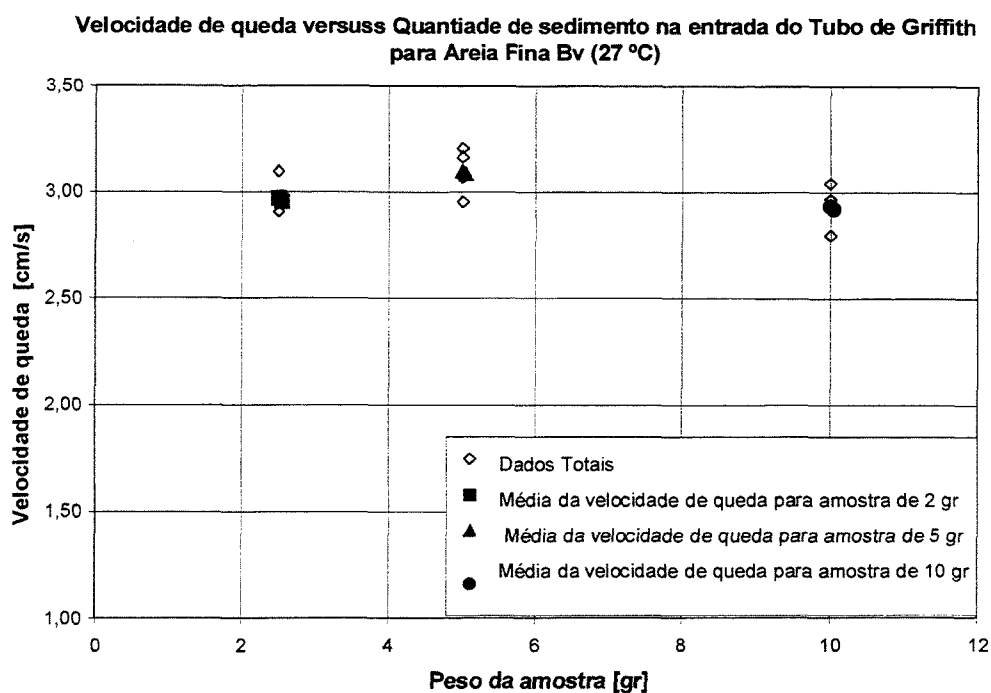


Figura 5.10. Gráfico comparativo da velocidade de queda para diferentes quantidades de amostra de areia fina (solo Bv), em água limpa (27°C) para quantidades 2, 5 e 10 gramas.

Optou-se por 5 g como quantidade padrão pelo fato que uma amostra com 2 g aumenta o risco de perda de material e uma amostra de 10g requer um volume maior de material a ser extraído dos solos em estudo.

5.4.5. Resultados da medição da velocidade de queda em água limpa

Para cada solo em estudo foram realizados três testes repetitivos para cada uma das três classes do material grosso (AM, AF e AMF).

Na tabela 5.17 são apresentadas as médias da velocidade de queda dos três testes repetitivos para cada uma das três classes analisadas em cada tipo de solo. Também são apresentados as velocidades teóricas calculadas com as equações sugeridas por Concharov, Van Rijn e Cheng (item 3.3.3.) e os erros relativos da velocidade experimental referente às velocidades teóricas já mencionadas.

O cálculo do erro é feito da seguinte forma:

$$\text{Erro} = \frac{|\text{valor experimental} - \text{valor teórico}|}{\text{valor teórico}} \times 100 \quad (5.15)$$

Tabela 5.17. Resultados comparativos da velocidade de queda experimental e teóricas para água limpa

Tipo de solo	T [°C]	Classe	Neste estudo	Concharov (1962)		Van Rijn (1989)		Rubey (1933)		Cheng (1997)	
			Velocidade Queda Experimental [cm/s]	Velocidade Queda teórica [cm/s]	Erro [%]	Velocidade Queda teórica [cm/s]	Erro [%]	Velocidade Queda teórica [cm/s]	Erro [%]	Velocidade Queda teórica [cm/s]	Erro [%]
Bv	22	AM	5,59	4,03	38,76	5,64	0,85	5,01	11,63	4,53	23,43
Bv	21	AF	2,81	1,87	50,30	2,26	24,48	2,25	24,69	1,70	65,73
Bv	22	AMF	0,93	0,55	69,01	0,77	20,67	0,73	27,38	0,53	76,55
Tr	22	AM	4,70	4,70	0,02	6,22	-24,41	5,49	-14,42	5,04	-6,71
Tr	22	AF	2,83	2,16	31,11	2,54	11,32	2,51	12,60	1,91	48,22
Tr	22	AMF	1,09	0,66	66,73	0,91	19,25	0,86	27,05	0,62	76,20
V	23	AM	4,36	3,44	26,87	5,07	27,68	4,53	-3,72	4,05	7,75
V	23	AF	2,17	1,64	31,82	2,02	7,51	2,02	7,21	1,52	43,09
V	24	AMF	0,89	0,48	85,36	0,70	14,05	0,66	34,35	0,48	86,15

Com respeito aos resultados da análise comparativa das velocidades de queda experimentais com as teóricas, pode-se observar que os valores experimentais deste estudo tiveram menores índices de porcentagens de erro quando foram comparados com os valores de velocidade de queda teórica de Van Rijn, em média erros não maiores que 28%. Os resultados comparativos de velocidade de queda aplicando o modelo de Rubey foram observados erros até 34%. No caso dos erros observados para a análise comparativa com as outras duas velocidades teóricas (Concharov e Cheng), observa-se valores de erro até 86% (especificamente nos valores da classe AMF).

Uma possível explicação para estes resultados pode ser que, na realização destes testes, o efeito da umidade tenha sido um fator determinante no aumento da velocidade de queda, devido à agregação das amostras secas. O ingresso das amostras se deu na forma de um bloco e não de forma dispersa, o que originaria uma aceleração da amostra nos primeiros trechos do percurso do tubo. De maneira visual, a distância que é percorrida pela amostra em forma de bloco é aproximadamente 30 cm desde o nível superior da água retida no tubo, após esta distância, os sedimentos da amostra se precipitam de forma dispersa.

No processo de calibração do tubo foram inicialmente utilizadas esferas de sílica com uma faixa de diâmetros de grão da areia fina, mas devido ao processo fabricação das esferas, estas apresentaram carga elétrica na sua superfície que em contato com água gera o efeito de

formar agregados. A dificuldade de avaliar estes tipos de sedimentos de formas esféricas não permitiu inferir o grau de precisão do tubo e avaliar o efeito da forma do sedimento na velocidade de queda.

5.4.6. Resultados dos testes de medição da velocidade de queda de material grosso em água com material fino em suspensão.

Estes testes consistiram em determinar a velocidade de queda de um material grosso dentro de um fluido de mistura água-material fino com diferentes concentrações volumétricas para um mesmo tipo de solo.

Tabela 5.18. Resumo dos testes realizados para o material grosso em água com material fino em suspensão para os solos Bv, Tr e V

Tipo de solo	Classes de material grosso testadas	Quantidade de repetições	Concentrações volumétricas testadas Cv [%]	Total de teste para cada tipo de solo
Bv	AM, AF e AMF	3	1,20; 2,49 e 3,54	27
Tr	AM, AF e AMF	3	1,70; 3,70 e 7,20	27
V	AM, AF e AMF	3	1,01; 3,02 e 7,11	27
Total de testes				81

- Testes Preliminares

Seguindo a metodologia descrita no item 4.6 (h), observou-se que, para manter o fluido fino em suspensão, foi necessária a utilização de um agente defloculante. Devido à grande quantidade de material fino a ser utilizada assim como o emprego de uma quantidade significativa de agente defloculante para manter este sedimento fino em suspensão, testou-se a possibilidade de otimizar material empregado mediante a reciclagem do material fino usado em cada teste. Um teste de medição de velocidade de queda com material fino reciclado foi realizado tomando como material grosso a areia fina do solo Vertissolo e um fluido de mistura água-material fino com concentração volumétrica $C_v = 7,11\%$.

Na figura 5.11 pode-se observar que os valores de velocidade de queda são muito próximos, apesar de se tratar do mesmo material sendo lançado em dois tipos distintos de fluido em repouso (água limpa e mistura água-material fino com $C_v = 7,11\%$). Esperava-se que a velocidade de queda do material grosso no fluido de mistura ($C_v = 7,11\%$) fosse menor que a

apresentada na água limpa devido ao efeito da concentração.

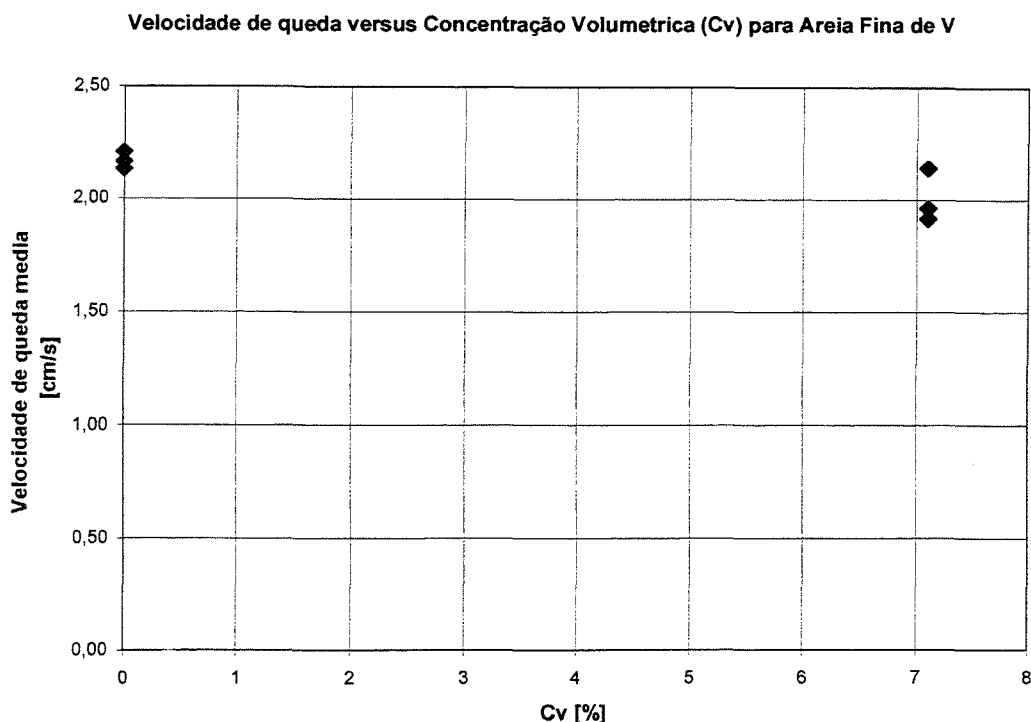


Figura 5.11. Resultados da velocidade de queda para AF do solo V para água limpa ($T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$) e para fluido de mistura água-material fino reciclado com $Cv=7,11\%$ ($T=26\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Isto sugere que o material reciclado teve uma mudança significativa na sua composição química, o que agiria sobre a velocidade de queda. Visualmente se comprovou uma mudança na coloração do fluido de mistura, passando de uma coloração cinza escuro para uma tonalidade mais laranja (cor do recipiente giratório de coleta), o que indica que parte da pintura do recipiente de coleta foi diluída pelo agente defloculante (o que foi confirmado visualmente com o recipiente de coleta seco) e modificou as propriedades do fluido de mistura. Devido a esses resultados, a possibilidade do emprego de material reciclado foi descartada.

- Solo Bv

A tabela 5.19 a seguir apresenta um resumo de velocidade de queda para as diferentes classes de material grosso testadas dentro de fluidos de mistura com três concentrações volumétricas. Os valores da velocidade de queda para $Cv=0$ são as mesmas velocidades determinadas no item 5.45, para água limpa.

O cálculo do erro do peso é feito da seguinte maneira:

$$\text{Erro peso} = \frac{|\text{peso antes do teste} - \text{peso após do teste}|}{\text{peso após teste}} \times 100 \quad (5.16)$$

O termo “peso antes do teste” se refere ao peso total da amostra antes do início do teste, o termo “peso após da amostra” se refere ao peso total encontrado em todas as bandejas ou recipientes de coleta no final do teste. Este erro expressa a perda de material durante o experimento, cujas causas podem ser várias, uma delas é devido a que uma parte do material grosso ficou retido no copo do sistema de admissão da amostra por efeito da umidade da amostra, uma outra pode ser devido a perdas no trajeto ao longo do tubo (bolhas de ar aderidas nas paredes do tubo capturam parte do material precipitado e que não foram retiradas via bomba de vácuo, devido a problemas de vedação do tampão de borracha do sistema de coleta) e finalmente uma outra é devido à estratificação da massa específica do fluido dentro do tubo e no sistema de coleta, encontrando-se a maior massa específica da estratificação nas partes inferiores do tubo e do sistema de coleta, sendo que na região entre a saída do tubo e as bandejas coletoras se formaram gradientes de massa específica, que originaram correntes de fluxo que ocasionaram o desvio e perda de material grosso que sai da parte inferior do tubo em direção as bandejas coletoras.

Para facilitar a análise dos dados introduziu-se o termo de velocidade de queda adimensionalizada, w_m/w , a qual é constituída pela razão entre a velocidade de queda do material grosso de qualquer classe em um fluido com uma concentração volumétrica $C_v > 0$ %, w_m e a velocidade de queda calculada em água limpa, w .

Tabela 5.19 . Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do solo Bv

Tipo de solo	C_v [%]	Classe	Velocidade Queda [cm/s]	Erro peso [%]	Temperatura [°C]	w_m/w
Bv	0	AM	5,59	6,20	22	1,00
Bv	1,20	AM	5,48	1,10	24	0,98
Bv	2,49	AM	4,31	2,33	24	0,77
Bv	3,54	AM	3,39	5,22	24	0,61
Bv	0	AF	2,81	2,80	21	1,00
Bv	1,20	AF	2,68	5,93	22	0,95
Bv	2,49	AF	1,87	13,60	24	0,66
Bv	3,54	AF	1,45	11,78	24	0,52
Bv	0	AMF	0,93	5,93	22	1,00
Bv	1,2	AMF	0,87	6,80	23	0,93
Bv	2,49	AMF	0,74	20,90	23	0,79
Bv	3,54	AMF	0,61	20,25	24	0,66

Na tabela 5.19 se observa que para todas as classes de material grosso analisadas, há uma diminuição da velocidade de queda devido ao incremento da concentração volumétrica no fluido de mistura. Os erros de peso são maiores quando se analisa uma classe de material grosso com diâmetros menores. Esses erros são causados pelas perdas que ocorrem pelo efeito da umidade que causa a adesão de parte do material grosso ao copo de entrada ou às paredes do tubo.

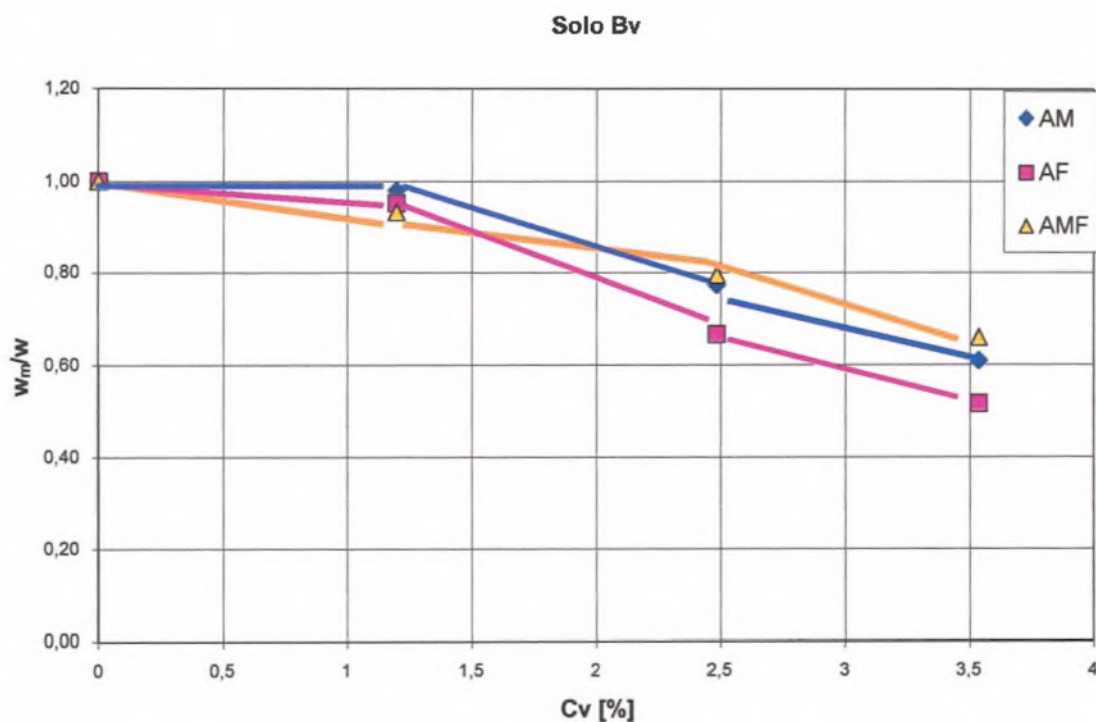


Figura 5.12. Efeito da concentração sobre a velocidade de queda adimensionalizada para solo Bv (classes AM, AF e AMF)

Na figura 5.12 mostram-se as curvas do efeito da concentração sob a velocidade de queda adimensional dos materiais grossos de classes AM, AF e AMF. Comparando as curvas de AM e AF, observa-se um comportamento similar devido ao efeito da concentração (comportamento decrescente com o aumento da concentração). Também pode ser observado que a curva da AM fica acima da curva AF. No caso da curva AMF, também é verificada uma tendência de decaimento com o aumento da concentração. Parte desta curva (nos pontos $C_v=2,49\%$ e $C_v=3,54\%$) apresentam valores de velocidade adimensional superiores aos observados nas curvas AM e AF, nos mesmos pontos de análise, gerando uma sobreposição da curva AMF sob as curvas AM e AF.

- Solo Tr

Na tabela 5.20 se observa que há uma diminuição da velocidade de queda com o incremento da concentração volumétrica no fluido de mistura quando se utiliza o solo Terra Roxa. Os erros de peso são maiores quando se analisa uma classe de material grosso com diâmetros menores. Os valores de erro na classe AMF são maiores, devido ao efeito da umidade.

Tabela 5.20. Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do solo Tr

Tipo de solo	Cv [%]	Classe	Velocidade Queda [cm/s]	Erro peso [%]	Temperatura [°C]	w_m/w
Tr	0	AM	4,70	5,27	22	1,00
Tr	1,7	AM	4,72	5,44	24	1,00
Tr	3,7	AM	2,58	11,39	25	0,55
Tr	7,2	AM	1,93	2,06	24	0,41
Tr	0	AF	2,83	1,80	22	1,00
Tr	1,7	AF	2,06	5,89	24	0,73
Tr	3,7	AF	1,17	6,47	25	0,41
Tr	7,2	AF	0,97	2,00	25	0,34
Tr	0	AMF	1,09	12,30	22	1,00
Tr	1,7	AMF	0,78	10,78	25	0,71
Tr	3,7	AMF	0,62	21,72	25	0,56
Tr	7,2	AMF	0,54	75,61	25	0,50

A figura 5.13 apresenta as curvas do efeito da concentração sob a velocidade de queda adimensional dos materiais grossos das classes AM, AF e AMF.

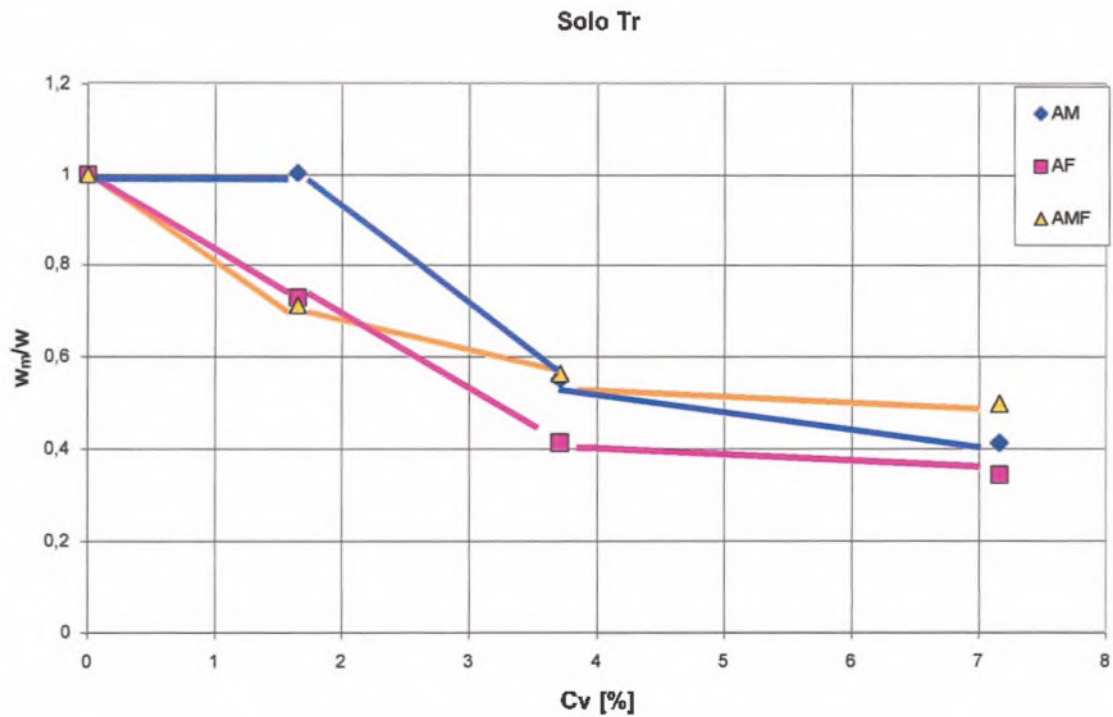


Figura 5.13. Efeito da concentração sobre na velocidade de queda adimensionalizada para solo Tr (classes AM, AF e AMF).

Comparando as curvas AM e AF se observa um comportamento, quase similar ao encontrado na análise das curvas AM e AF do solo Bv. Deve-se destacar o ponto singular de $C_v=1,7\%$ da curva AM, onde o valor observado é muito próximo ao da água limpa, sugerindo que o efeito da concentração na velocidade de queda foi nulo. Com respeito à curva AMF também é observado que ela se situa acima das curvas AM e AF nos pontos $C_v=3,70\%$ e $C_v=7,20\%$.

- Solo V

Na tabela 5.21 se observa, de modo similar ao encontrado nos resultados dos solo Bv e Tr, que há uma diminuição da velocidade de queda com o incremento da concentração volumétrica no fluido de mistura. Os erros de peso são maiores quando se analisa uma classe de material grosso com diâmetros menores, os valores de erro na classe AMF são maiores. Isto pode ser explicado pelo efeito da umidade .

Tabela 5.21 . Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do solo V

Tipo de solo	Cv	Classe	Velocidade Queda	Erro peso	Temperatura	w_m/w
V	0	AM	4,36	0,73	23	1,00
V	1,01	AM	3,54	6,38	19	0,81
V	3,02	AM	2,77	2,41	18	0,64
V	7,11	AM	1,51	8,10	26	0,35
V	0	AF	2,17	0,93	23	1,00
V	1,01	AF	1,51	10,22	18	0,70
V	3,02	AF	1,14	9,77	18	0,53
V	0	AMF	0,89	11,87	24	1,00
V	1,01	AMF	0,52	12,09	18	0,58
V	3,02	AMF	0,41	18,56	18	0,45
V	7,11	AMF	0,40	29,40	20	0,44

A figura 5.14 apresenta as curvas do efeito da concentração sob a velocidade de queda adimensional dos materiais grossos das classes AM, AF e AMF.

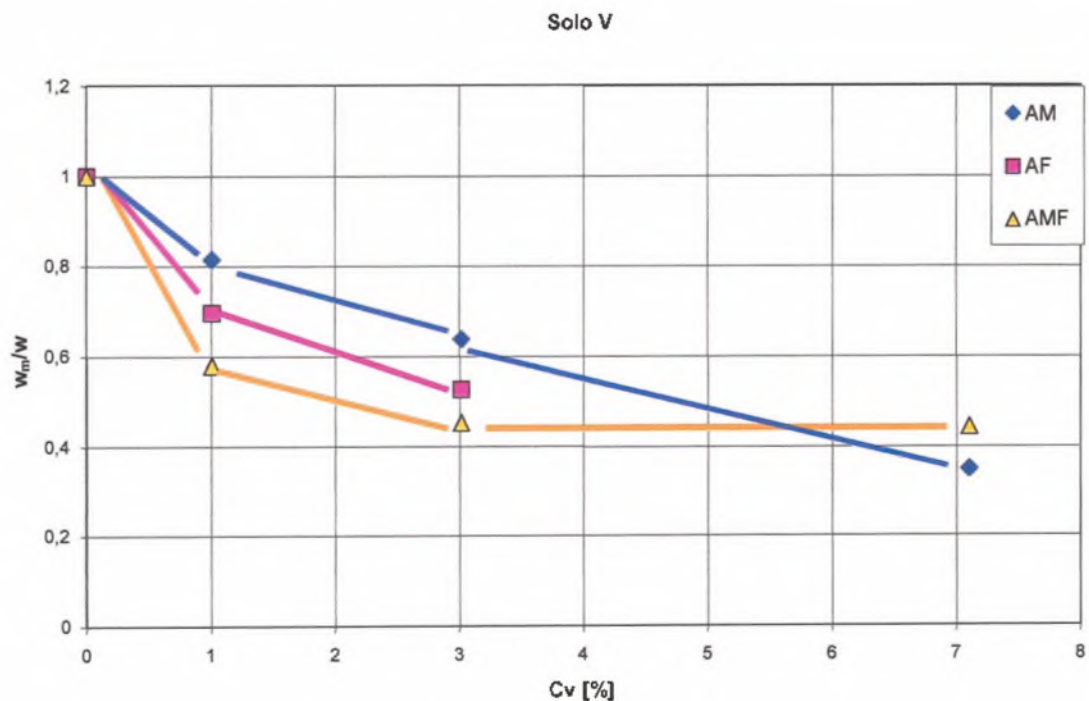


Figura 5.14. Efeito da concentração sobre a velocidade de queda adimensionalizada para solo V (classes AM, AF e AMF).

Comparando as curvas AM e AF se observa também um comportamento quase similar aos encontrados na análise das curvas AM e AF dos solos Bv e Tr. Com respeito à curva

AMF, só para $C_v=7,11\%$ é que ela se situa acima da curva AM.

Observando os resultados dos três solos (Bv, Tr e V) pode-se concluir o seguinte:

- As velocidades de queda adimensional decrescem com o aumento da concentração;
- A curva da classe AF é localizada a baixo da curva da classe AM;
- Observa-se, em geral, que a curva AMF situa-se acima das curvas AM e AF nos dois últimos pontos de análise para o solo Bv ($C_v=2,49\%$ e $C_v=3,54\%$); para o solo Tr nos pontos $C_v=3,7\%$ e $C_v=7,2\%$ e para o solo V foi observado um único ponto de sobreposição, $C_v=7,11\%$.

A diminuição da velocidade de queda adimensional com o aumento da concentração é um comportamento que guarda coerência com a natureza do fenômeno. Sabemos que a queda de uma partícula individual a uma velocidade constante ocorre devido ao equilíbrio entre duas forças que atuam na partícula: a força de arraste F_d (resistência à queda devido a ação do fluido sobre a superfície da partícula) e a força de peso efetivo F_e (resultado da ação do peso real da partícula e a força de empuxo),

Define-se as forças de arraste como:

$$F_d = C_d \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\rho_m w_m}{2} \quad (5.17)$$

w_m é a velocidade de queda da partícula num fluido de mistura, C_d é o coeficiente de arraste e é função inversa do Reynolds da partícula ($Re_d = \frac{w_m d}{\nu_m}$), ν_m é a viscosidade cinemática de mistura.

A força de peso submerso é:

$$F_e = (\rho_s - \rho_m) g \frac{\pi}{6} d^3 \quad (5.18)$$

onde ρ_m é a massa de mistura, cujo cálculo depende da C_v e ρ , concentração volumétrica, massa específica da água, equação 3.17, ρ_s e d são a massa específica grosso e o diâmetro do material grosso.

Então, sendo $F_d=F_e$ temos a seguinte expressão simplificada:

$$(\rho_s - \rho_m) g \frac{\pi}{3} d = C_d \frac{\rho_m w_m^2}{4} \quad (5.19)$$

Um aumento da C_v representará um aumento da massa específica do fluido de mistura. Um aumento desta massa específica significa uma diminuição da força de peso submerso (lado esquerdo da equação 5.19). No outro extremo da equação, um aumento da concentração

determina um aumento da viscosidade cinemática. Ao aumentar v_m diminui Re_d e o valor C_d aumenta. Com o aumento deste último, o valor de w terá que diminuir para manter a igualdade com o extremo esquerdo.

Para estabelecer o verdadeiro posicionamento das curvas AM, AF e AMF, requer-se uma análise na qual a massa específica do fluido de mistura seja constante e que o diâmetro da partícula em estudo (diâmetro médio da classe) diminua. Para estas condições, o valor do extremo esquerdo da equação 5.19 diminuirá com o decréscimo do diâmetro da partícula. No extremo direito da equação 5.19, a diminuição do diâmetro de análise acarretaria uma diminuição do Re_d , isto é um aumento do C_d . Com o aumento de C_d , o valor de w deve diminuir para manter a igualdade com o outro extremo da equação.

Em resumo as curvas AM, AF e AMF, decrescem com o aumento da concentração. O posicionamento de cada curva guarda relação com o diâmetro da classe analisada, as curvas das classes com diâmetro maiores ficaram acima das curvas com diâmetro de classes menores. A figura 5.15 mostra esta afirmação, deve-se mencionar que esta é do tipo ilustrativa.

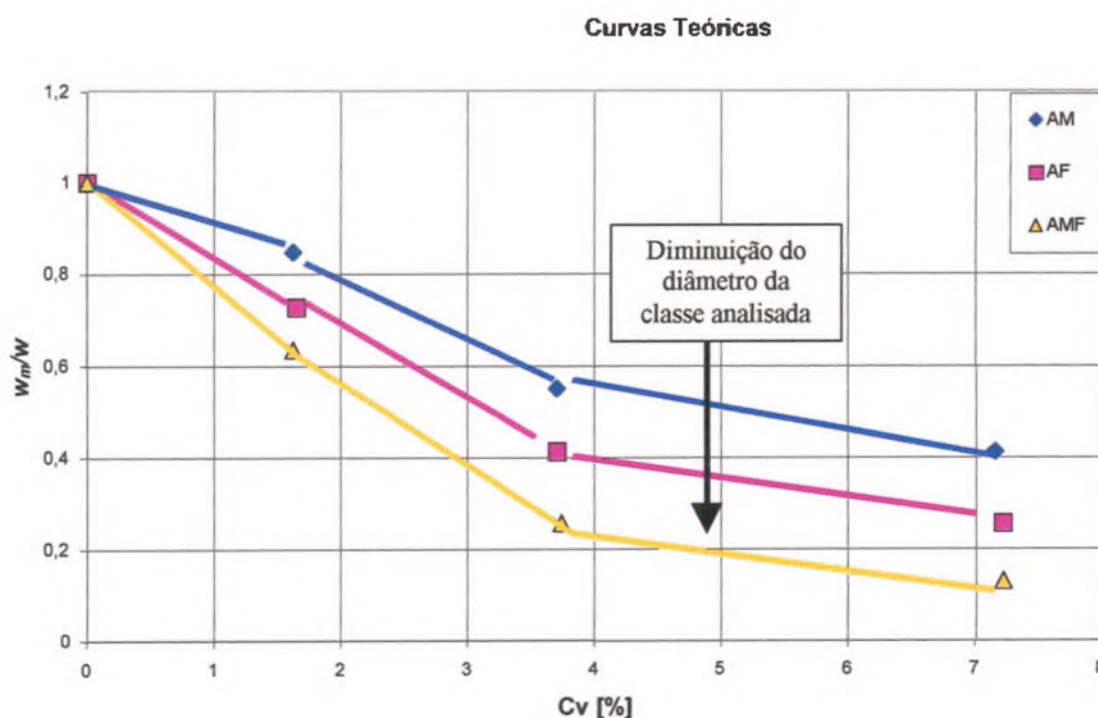


Figura 5.15. Curvas teóricas do comportamento da velocidade de queda adimensional com a concentração para as classe em estudo de AM, AF e AMF.

O fato da curva AMF estar, para algumas concentrações, situada acima das outras curvas (AM e AF), representa um erro cuja origem está no longo tempo de duração dos testes para

classe AMF, permitindo uma estratificação da massa específica do fluido dentro do tubo e no sistema de coleta, formando gradientes de massa específica que geraram correntes de fluxo e transferência de massa por difusão natural na região entre o tubo e o sistema de coleta. No transcorrer do tempo isto representa uma diminuição da massa específica dentro do tubo, ocasionando uma velocidade de queda de material grosso maior que a esperada. O efeito do agente defloculante varia de acordo com o tipo da composição mineralógica do material fino em suspensão. Isto explica porque a curva AMF apresenta um só ponto de sobreposição para o solo V enquanto que para os solos Bv e Tr as mesmas apresentem dois pontos de sobreposição.

5.5. Estudo do Perfil de Velocidades em Fluxo com Sedimentos de Suspensão

5.5.1. Resultados do testes preliminares

Nesta parte foram definidas os parâmetros de funcionamento do canal. Para isto, foram selecionadas duas declividades 5% e 8,7% denominadas para fins práticos como D5 e D8 respectivamente. Acredita-se que duas declividades são suficientes para fazer uma análise inicial comparativa do efeito da declividade no comportamento do escoamento.

A seleção da vazão de trabalho se deu em função da vazão máxima fornecida pela bomba (registro de controle de vazão totalmente abertos), devido ao fato de que não se possuía um sistema de controle de vazão exata. Intuiu-se que nem sempre a vazão máxima é constante, e esta terá seu valor modificado quando se variou a concentração do material em suspensão. Deve-se mencionar também outros problemas tais como a queda de tensão do sistema de alimentação elétrica que afeta a vazão máxima fornecida pela bomba.

Os resultados da determinação da declividade ótima do piezômetro inclinado mostraram que um ângulo de 20 ° apresenta valores de medida de coluna de água mais estáveis, pelo fato de não apresentar efeitos de capilaridade e oferecer a maior resolução possível.

Os testes de medição do perfil transversal de velocidade no canal, para o caso de uma declividade de 5%, mostraram velocidades uniformes, figura 5.16, que permitem definir um único ponto de análise na seção transversal para o levantamento do perfil de velocidade ao longo da altura do escoamento. Por motivos práticos, foi escolhido o ponto central da seção transversal do canal.

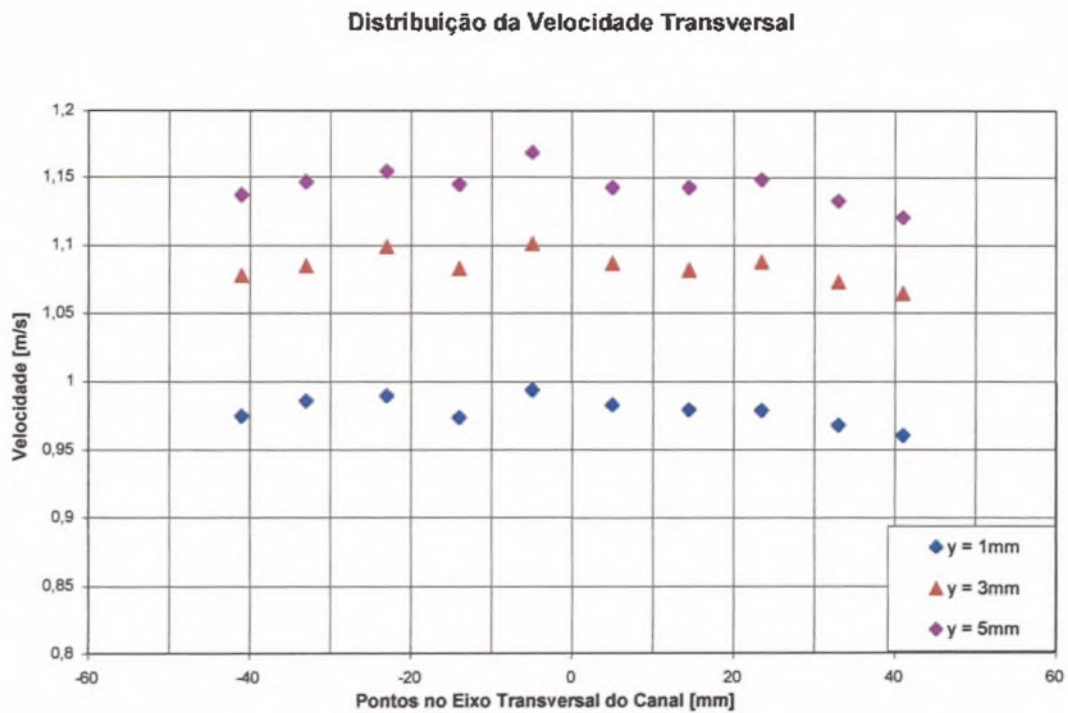


Figura 5.16. Distribuição dos perfis de velocidade transversal no canal para três diferentes alturas referentes ao fundo ($y=1\text{mm}$, $y=3\text{mm}$ e $y=5\text{mm}$).

5.5.2. Procedimento para o cálculo do perfil de velocidade no canal com água limpa

O procedimento do cálculo do perfil de velocidade se constitui de duas partes: calibração do sistema de medição de velocidade e cálculo do perfil de velocidade.

A calibração estática tem como finalidade estabelecer uma curva de referência entre a leitura observada no piezômetro inclinado e sua equivalência quantitativa do ponto de vista de coluna de velocidade total (dinâmica e estática) sobre o canal. Para esta etapa é empregado um recipiente de acrílico de calibração (figura 5.17).

O procedimento para a calibração estática do sistema de velocidade é o seguinte:

1. Fazer leituras no paquímetro do fundo do canal (L_{pf}). Após isto, colocar o recipiente de acrílico de calibração e fazer leituras dos diferentes níveis de água (L_p) com suas respectivas leituras no piezômetro inclinado (L_{pi}). Todas estas leituras do paquímetro são referentes ao eixo pp' da ponta linimétrica, deve-se transferir todas estas leituras para o eixo cc' do tubo de Pitot.

2. Leituras do paquímetro dos níveis de água na calibração são transformadas para leituras de alturas de água no eixo cc' :

$$L_{cc'} = L_{pf} - L_p - d \operatorname{Tang} \alpha \quad (5.20)$$

Onde $\operatorname{tang}(\alpha)$ é declividade do canal.

3. Transferir para o eixo zz' :

$$L_{zz'} = L_{cc'} \operatorname{Cos} \alpha \Rightarrow L_{zz'} = (L_{pf} - L_p - d \operatorname{Tang} \alpha) \operatorname{Cos} \alpha \quad (5.21)$$

4. Fazer um ajuste linear dos valores $L_{zz'}$ versus leitura de piezômetro inclinado e calcular o valor de zero no piezômetro inclinado (0_{pi}).

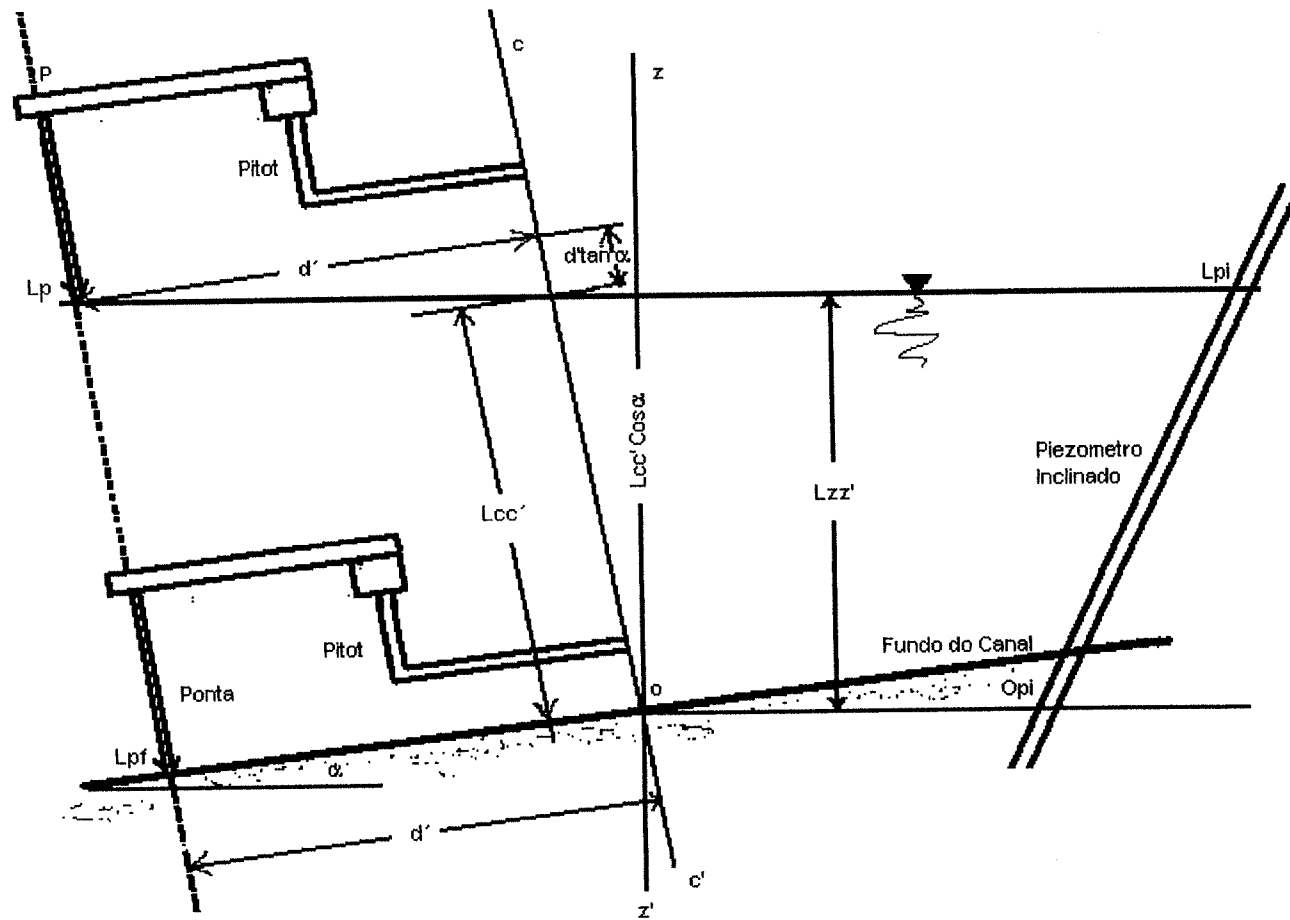


Figura 5.17. Calibração estática em água limpa

O cálculo do perfil de velocidade consiste em fazer leituras de coluna de água no piezômetro inclinado obtidas do teste do escoamento no canal para diferentes pontos de profundidade da altura do escoamento e transformar estas leituras em coluna de água de velocidade total: estática e dinâmica (figura 5.18).

O procedimento do cálculo da velocidade em água limpa é a seguinte:

5. Fazer leituras em diferentes profundidades para o escoamento em circulação sobre o canal. Obtém-se leituras do paquímetro no eixo cc' em diferentes profundidades y e do piezômetro inclinado $L_{pi_dinamica}$.

6. Calcular a altura total de água sobre o tubo inclinado:

$$H_{\text{total no piezômetro inclinado}} = L_{pi_dinamica} - 0_{pi} \quad (5.22)$$

7. Transferir os valores de $H_{\text{total no piezômetro inclinado}}$ para valores verticais de altura de água empregando o ajuste linear do passo 4.

8. Os novos valores de $H_{\text{total no piezômetro inclinado}}$ são $H_{\text{total vertical}}$. Então, pelo gráfico, o valor da velocidade para qualquer profundidade y é:

$$u = \sqrt{2g(H_{\text{total_vertical}} - \frac{(h-y)}{\text{Cos}\alpha} - y\text{Cos}\alpha)} \quad (5.23)$$

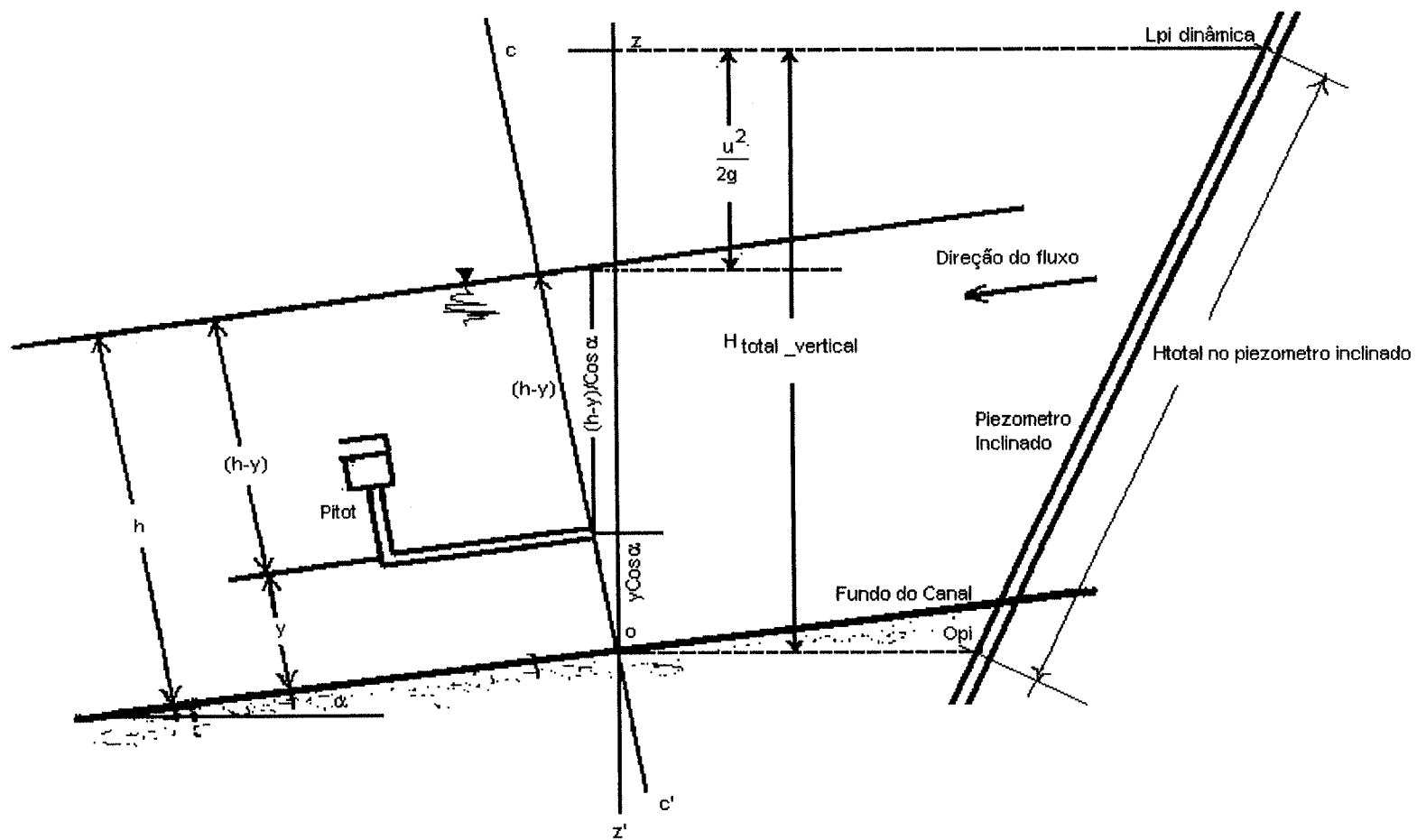


Figura 5.18. Cálculo da velocidade em água limpa

5.5.3. Resultados do perfil de velocidade para água limpa

Como mencionou-se no capítulo de metodologia (item 4.7), esta parte teve como objetivo avaliar o perfil de velocidade para o escoamento de água limpa. Esse resultado servirá como base para a análise comparativa do efeito da concentração no perfil.

A tabela 5.22 mostra um resumo dos dez testes realizados dentro de duas declividades de canal para diferentes temperaturas e para a condição de vazão máxima fornecida pela bomba. A primeira coluna define a codificação do teste. Após isto, são mostrados a declividade do canal (S), a vazão (Q) calculada pelo método volumétrico, a altura do escoamento (h), a velocidade cisalhante u^* , a velocidade média obtida a partir da área transversal do escoamento e a vazão. Tem-se também, a viscosidade cinemática, o número de Reynolds referente ao escoamento do canal ($Re_m = \frac{R_h U}{\nu}$ onde R_h é o raio hidráulico) e a temperatura.

Os valores dos testes ALD5(1a) e ALD5(2a), representam testes realizados em datas diferentes e sob as mesmas condições de declividade e para vazão máxima de operação que os testes ALD5(1), ALD5(2), ALD5(3), e ALD5(4). O mesmo caso é do teste ALD8(1a) com respeito aos testes ALD8(1), ALD8(2) e ALD8(3).

Tabela 5.22. Resumo dos testes realizados para água limpa

Teste No	S [%]	Cv [%]	Q [l/s]	h [mm]	u^* [m/s]	U [m/s]	ν [m ² /s]	Re_m	T °C
ALD5(1)	5,0	0	0,929	7,43	0,0569	1,0425	8,519E-07	32342	28
ALD5(2)	5,0	0	0,929	7,43	0,0569	1,0425	8,519E-07	33276	30
ALD5(3)	5,0	0	0,929	7,43	0,0569	1,0425	8,519E-07	34036	32
ALD5(4)	5,0	0	0,929	7,43	0,0569	1,0425	8,519E-07	34474	34
ALD5(1a)	5,0	0	0,929	7,50	0,0572	1,0347	8,181E-07	33728	31
ALD5(2a)	5,0	0	0,929	7,50	0,0572	1,0347	8,095E-07	34084	32
ALD8(1)	8,7	0	0,930	6,25	0,0694	1,2396	8,519E-07	32945	28
ALD8(2)	8,7	0	0,930	6,25	0,0694	1,2396	8,280E-07	33897	30
ALD8(3)	8,7	0	0,930	6,25	0,0694	1,2396	8,095E-07	34671	32
ALD8(1a)	8,7	0	0,924	6,25	0,0694	1,2325	8,659E-07	32228	27

As figuras 5.19 e 5.20 mostram os perfis da velocidade para os diferentes testes. Observa-se que eles apresentam a forma parabólica e pouca diferença entre eles. Isto deve-se à similaridade de condições hidráulicas em que foram obtidas.

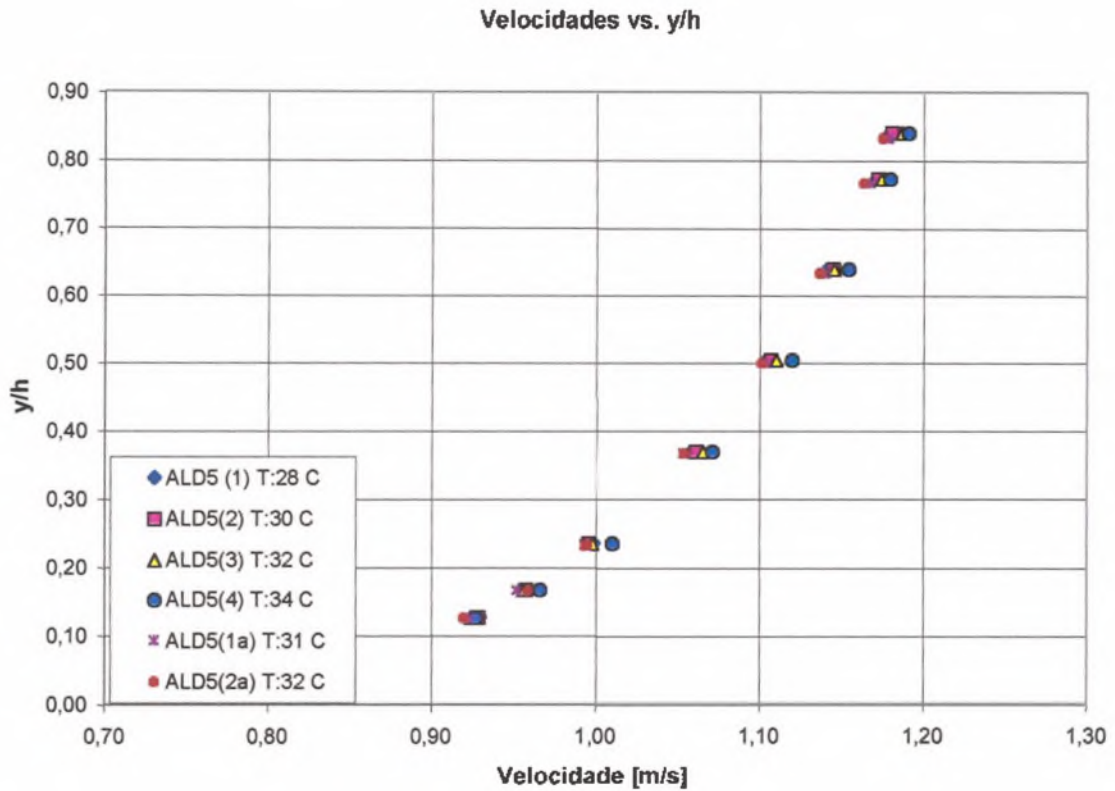


Figura 5.19. Perfil de velocidades medidos para água limpa, declividade 5%.

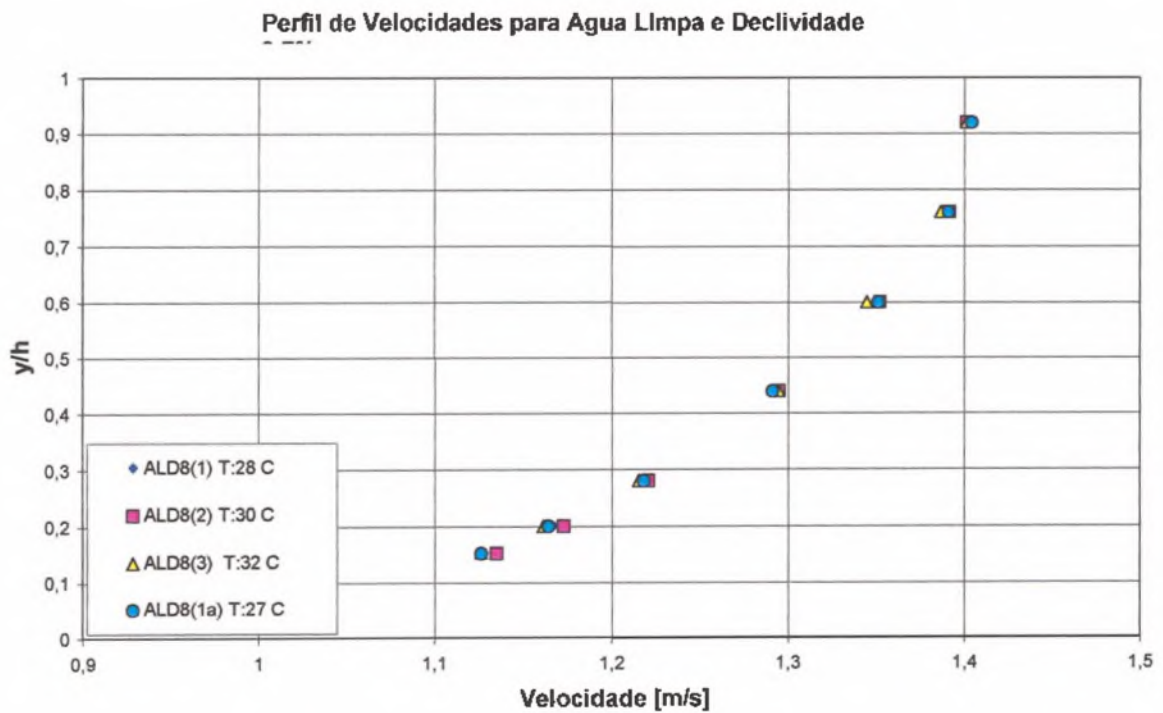


Figura 5.20. Perfil de velocidades medidos para água limpa, declividade 8,7%.

5.5.4. Fontes de erros de medição

As fontes de erros de medição ocorrem devido a: medição de vazão, medição da altura do escoamento, resolução de leitura do Pitot e erro de leitura do menisco da coluna de água no piezômetro inclinado.

1.- A medição da vazão é feita mediante o método volumétrico. A coleta do volume é feita através de mediante um balde graduado e o tempo de enchimento de um dado volume é contabilizado mediante um cronômetro de disparo manual. Por este motivo, os erros embutidos neste método são do tipo humano, no instante do início da coleta volumétrica e no instante da retirada do volume coletado. Para diminuir esse tipo de erro, buscou-se realizar um número máximo de medições de vazão. Em média, foram cinco medições para cada teste, que conduziram a erros baixos.

2.- A medição da altura também é uma fonte de erro, que afeta de modo direto o cálculo da velocidade média e da velocidade cisalhante. Para minimizar os erros de leitura, empregou-se uma ponta linimétrica (paquímetro de precisão) com uma resolução de leitura de 0,05mm. Em termos práticos, a medição de uma altura de escoamento de 6mm representa um erro de leitura de $0,05/6$, isto é 0,48% de erro. Como a medição é do tipo visual, tomou-se como referência de medição da altura a frequência das perturbações feitas pela ponta sobre a superfície do escoamento. Quando as perturbações apareciam de maneira discreta e verificava-se uma interrupção na ocorrência das mesmas, supunha-se que a ponta ainda não estava medindo a altura exata do escoamento. Quando a frequência das perturbações da ponta na superfície do escoamento apresentava uma ocorrência contínua, considerava-se que a ponta estava medindo a altura correta. Sabe-se que essa metodologia adotada é totalmente subjetiva, mas devido às dimensões da altura do escoamento foi a única forma de medição possível, dentro das limitações de não poder contar com outros equipamentos mais sofisticados.

3.- Quando fala-se de erro de resolução de leitura do Pitot, refere-se à filtragem de informação que acontece dentro da área de contato do tubo de Pitot com o escoamento, isto é, a área do círculo formado pelo diâmetro interno dentro do tubo. Para o presente estudo, tem-se um diâmetro interno de 1mm; então, quando fala-se de velocidade pontual dentro de uma altura determinada dentro do escoamento, na realidade fala-se de uma velocidade média dentro desta área de contato. A relação do diâmetro desta área de contato e a altura total de escoamento é d/h . Neste estudo, o valor verificado foi muito alto; por exemplo, para uma altura de lâmina de 7 mm esta relação é de $1/7$, podendo-se dizer que o diâmetro interno do Pitot representa 15% da altura do escoamento. Então, a velocidade calculada pelo Pitot é a

velocidade média dentro de 15% da altura. Deve-se mencionar que, apesar da limitação da resolução de leitura, os resultados de perfil de velocidade foram excelentes, chegando, no caso da análise do perfil de velocidade para declividade 5%, a valores das constantes da lei da parede de k e B similares aos obtidos por outros pesquisadores (item 5.5.3), demonstrando o grau de sensibilidade do equipamento de medição de velocidade.

4.- Outra fonte de erro possível é a leitura do menisco da coluna de água inclinada do tubo do piezômetro. Para diminuir ao máximo este tipo de erro, adotou-se um tempo máximo de espera de estabilização, em média 5 minutos. Após este tempo, foram realizadas cinco leituras, uma em cada minuto transcorrido. Em geral, não se observou mudanças significativas entre os 5 valores obtidos e a média correspondente.

Uma forma de avaliação conjunta dos graus de erro individuais mencionados anteriormente é mediante a comparação das velocidades U (calculada pela razão entre vazão total obtida pelo método volumétrico e área transversal $h.b$) e U' (calculada a partir da integração do perfil de velocidade determinada pelo sistema de medição de velocidade) da tabela 5.23.a. Na velocidade U estão inseridos os erros mencionados nos itens 1 e 2 e no valor da velocidade U' estão embutidos os erros 3 e 4.

Para uma análise de erro de leitura do sistema de medição empregou-se a velocidade U calculada a partir da razão entre Vazão total (obtida pelo método volumétrico) e a área transversal de escoamento ($h.b$); e a velocidade U' obtida a partir da integração do perfil de velocidade calculado pelo sistema de medição de velocidade, definida pela seguinte expressão:

$$U' = \frac{\int_0^h u.b. dy}{bh} = \int_0^h u \frac{dy}{h} = \sum_{i=0}^n \frac{1}{2} (u_{i+1} + u_i) \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{h} \right) \quad (5.24)$$

onde i é um ponto de medição de velocidade dentro do escoamento ($i=1,2,3... n$). O termo n é o número máximo de pontos de medição realizados dentro do escoamento de altura h e encontra-se localizado na altura $y_{max} < h$). Quando resolve-se a equação 5.20, em $i=n$ o valor de $u_{i-1}=u_i$ e $y_{i+1}=h$ para $i=0$ temos que $y=0$ e $u_i=0$.

O cálculo do erro da velocidade é

$$Erro\ Velocidade = \frac{U - U'}{U} \times 100 \quad (5.25)$$

A tabela 5.23.a mostra os erros de medição de velocidade para água limpa (para declividades de 5% e 7,8%). Os valores oscilam na faixa de 1,2% a 3,1%, independentemente das condições de declividade, vazão de trabalho e tempo em que foram realizadas as medições da velocidade. Pode-se concluir que o sistema apresenta uma precisão aceitável e uma

estabilidade temporal de leitura, apesar das limitações técnicas de mesura. Os valores dos erros de velocidade são todos positivos, indicando que o método de cálculo da velocidade U' apresenta uma tendência de subestimar os resultados da velocidade U (obtida pelo método volumétrico).

Tabela 5.23.a. Erros de medida da velocidade para água limpa (declividades 5% e 8,7%)

Teste No	U [m/s]	U' [m/s]	Erro Velocidade [%]
ALD5(1)	1,0425	1,0200	2,155
ALD5(2)	1,0425	1,0214	2,023
ALD5(3)	1,0425	1,0234	1,830
ALD5(4)	1,0425	1,0301	1,185
ALD5(1a)	1,0347	1,0093	2,459
ALD5(2a)	1,0347	1,0079	2,592
ALD8(1)	1,2396	1,2050	2,792
ALD8(2)	1,2396	1,2055	2,752
ALD8(3)	1,2396	1,2012	3,097
ALD8(1a)	1,2325	1,2034	2,363

A tabela 5.23.b e 5.23.c apresentam os resultados de erro de velocidade para o caso de fluido de mistura água-sedimento para declividade 5% e 8,7%, respectivamente.

Tabela 5.23.b. Erros de medida da velocidade para fluido de mistura água-sedimento para declividade de 5%

Tipo de Solo	Cv [%]	Erro Velocidade [%]
Bv	0,34	0,449
Bv	1,09	-3,248
Tr	1,23	-0,619
Tr	1,23	-0,240
Tr	2,89	1,963
Tr	5,96	-1,676
V	1,56	1,309
V	1,56	2,420
V	1,56	2,615
V	1,56	2,519
V	4,25	2,243
V	4,25	1,682
V	4,25	1,993
V	7,22	1,750
V	7,22	1,462

Tabela 5.23.c. Erros de medida da velocidade para fluido de mistura água-sedimento para declividade de 8,7%

Tipo de Solo	Cv [%]	Erro Velocidade [%]
Bv	0,508	4,286
Bv	1,350	3,041
Tr	1,326	3,653
Tr	1,326	3,880
Tr	2,820	2,937
Tr	5,971	5,010
V	1,723	2,572
V	1,723	2,187
V	1,723	2,133
V	4,100	3,425
V	4,100	2,781
V	4,100	2,778
V	4,100	1,592
V	4,100	1,771
V	6,864	4,792
V	6,864	4,847

Observa-se nas tabelas 5.23.b e 5.23.c, que os valores de erros de velocidade são na sua maioria positivos, indicando uma tendência por parte do método de cálculo da velocidade U' de subestimar os valores da velocidade U (método volumétrico).

Para uma melhor visualização da tendência da velocidade U' de subestimar os valores de velocidade U , foi construído o gráfico da figura 5.21, apresentando os erros de velocidade e a velocidade obtida pelo método volumétrico.

Finalmente, conclui-se que essa tendência da velocidade U' de subestimar os valores de U indica que existe um erro metodológico de cálculo cuja fonte pode ter origem nos erros de medição de altura do escoamento e nas simplificações realizadas no cálculo velocidade U a partir da integração do perfil de velocidade (devido a ausência da velocidade superficial do escoamento, é realizado um artifício de supor que a velocidade superficial é igual a velocidade medida mais próxima a superfície).

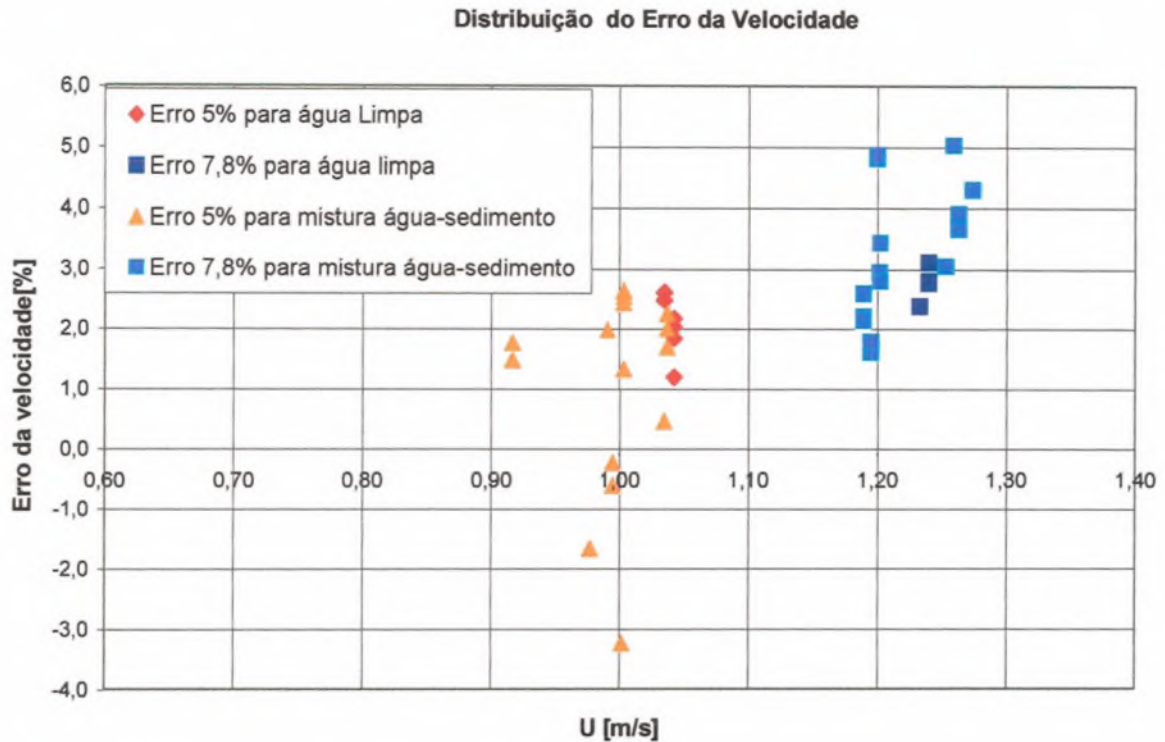


Figura 5.21. Distribuição do erro de velocidade

- Análise do perfil de velocidade empregando a lei da parede

Para a análise do perfil de velocidade, decidiu-se adimensionalizar as velocidades médias pontuais e a profundidade de medição. Como primeira opção de adimensionalização foram estabelecidos os valores de u/u^* e yu^*/ν . Em seguida, para uma primeira análise do perfil, se trabalhou com a equação de distribuição logarítmica de Von Karman-Prandtl (lei da parede) para regime turbulento em fundo liso. Deve-se mencionar que foi adotado o critério de trabalhar com a equação da lei da parede para todos os dados acima de $y/h > 0,2$. Nezu e Rodi (1986) sugerem a aplicação desta equação até $y/h = 0,6$; mas dentro do mesmo trabalho foi observado que a equação da lei da parede acompanha quase todo o perfil de velocidade experimental gerado em escoamentos com $Re_m < 40000$. No trabalho de Kirkgöz (1989), observa-se que a equação da lei da parede acompanha os perfis de velocidade experimentais para Re_m na faixa de 5000 a 50000.

Para se ter uma idéia do grau de acompanhamento da equação da lei da parede sobre os perfis de velocidade experimentais obtidos neste trabalho, comparam-se os perfis experimentais com os perfis teóricos gerados a partir da equação da lei da parede. Como exemplo são mostrados dois gráficos (figuras 5.22 e 5.24) realizados para declividades de 5% e 8,7%,

respectivamente.

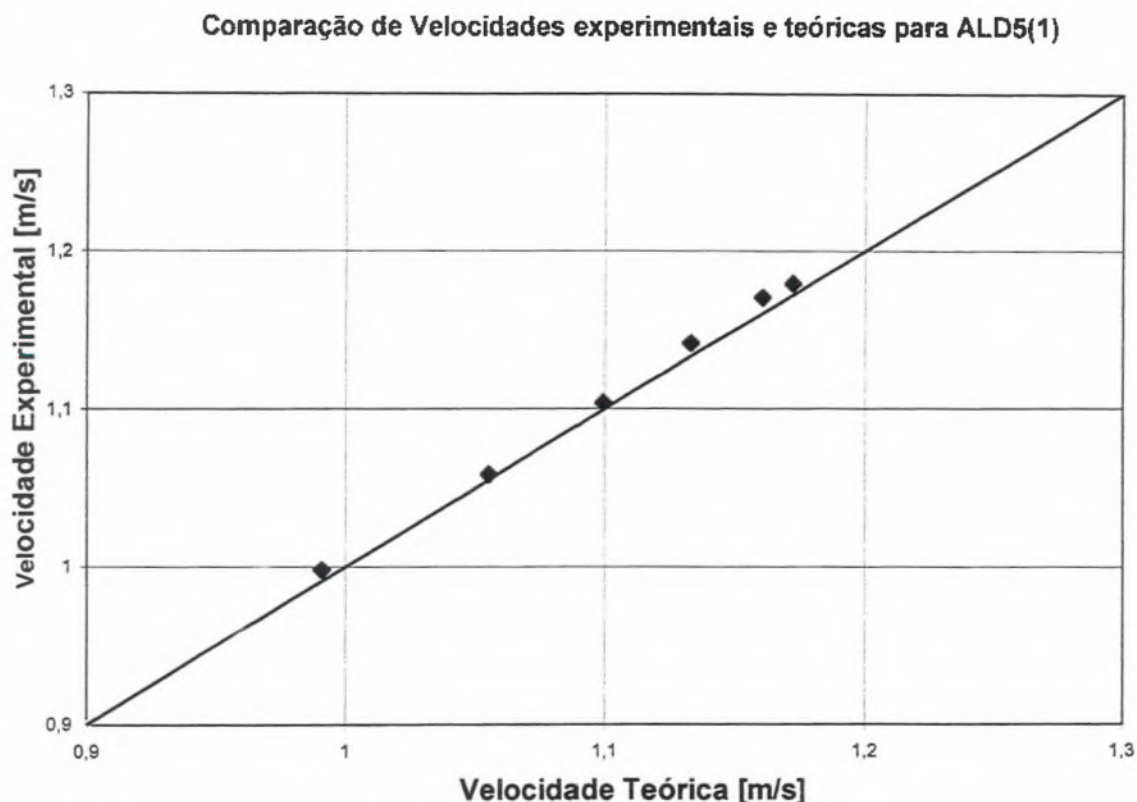


Figura 5.22. Comparação das velocidades experimentais e teóricas (lei da parede) para declividade 5 % com água limpa para 28 °C (teste ALD5(1)).

Da figura 5.22 observa-se no eixo das abcissas os valores das velocidades do perfil obtido pela equação da lei da parede e no eixo das ordenadas são colocados os valores das velocidades do perfil obtido de forma experimental. Cada ponto do gráfico tem como referência a mesma profundidade dentro da altura total do escoamento. Deve-se lembrar que este gráfico não considera valores de velocidade nas profundidades $y/h < 0,2$. Os resultados observados na figura 5.22 mostram que existe uma boa correspondência entre os valores experimentais e teóricos das velocidades. A linha reta de 45° que cruza o gráfico permite ter uma idéia do desvio entre o valor experimental ao teórico.

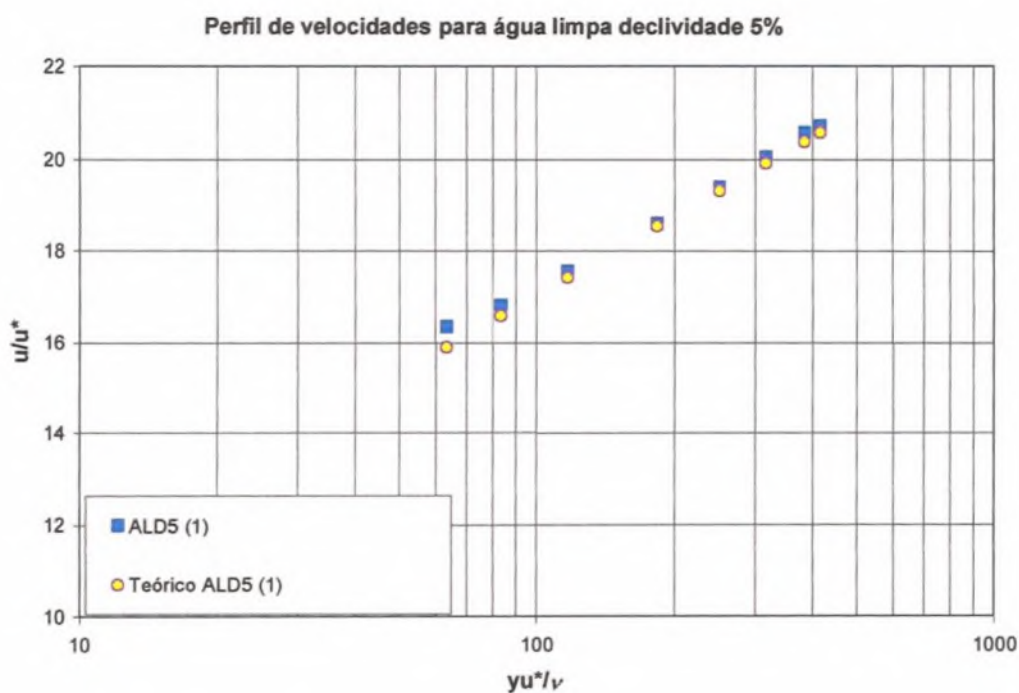


Figura 5.23. Gráfico comparativo dos perfis de velocidade experimental e teórico (lei da parede) ambos para o teste ALD5(1).

Na figura 5.23 são representados no eixo das abcissas o termo yu^*/ν e no eixo das ordenadas u/u^* . Constata-se uma boa concordância entre o perfil experimental ALD5(1) e o teórico (calculado com a equação da lei da parede para as mesmas condições hidráulicas de ALD5(1) considerando que as constantes A e B assumem, respectivamente, os valores 2,5 e 5,5).

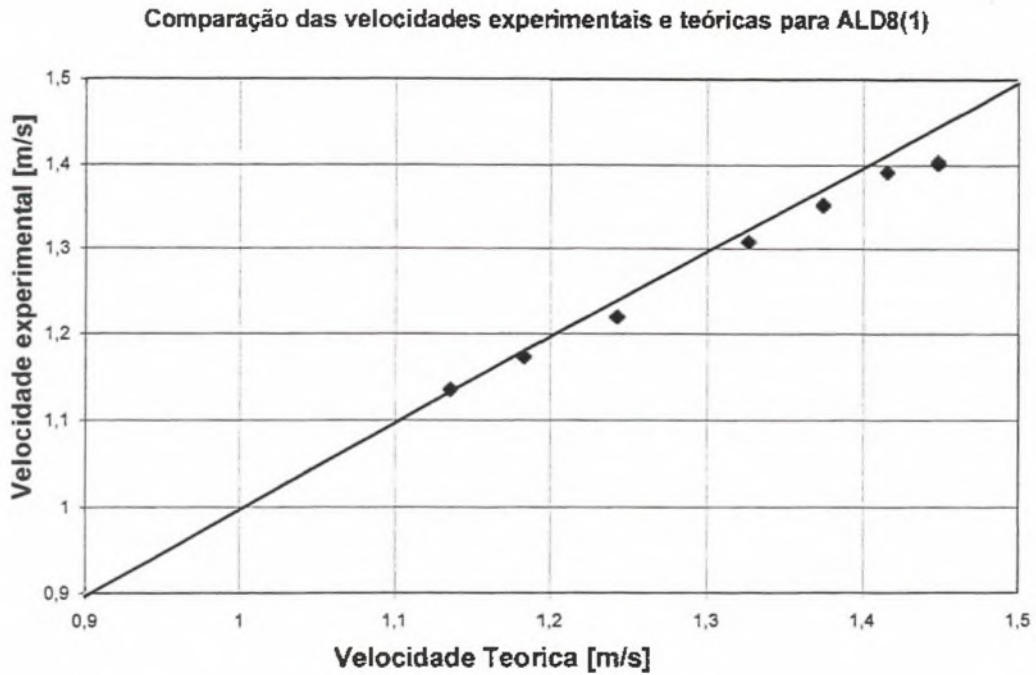


Figura 5.24. Comparação das velocidades experimentais e teóricas (lei da parede) para água limpa, declividade 8,7% e para 28 °C. Teste ALD8 (1).

Na figura 5.24 se observa um leve desvio dos pontos do gráfico para a parte inferior da reta de 45 °, o que significa uma super estimativa dos valores teóricos com respeito aos valores experimentais. Uma possível explicação deste fenômeno é o “erro de resolução” do Pitot. Este fato será discutido mais amplamente quando for abordado o tema de fontes de erro.

De forma similar a declividade 5%, na figura 5.25 são representados no eixo das abcissas o termo yu^*/v e no eixo das ordenadas u/u^* e constata-se o desvio entre o perfil experimental ALD8(1) e o teórico (calculado com a equação da lei da parede para as mesmas condições hidráulicas de ALD8(1) considerando $A=2,5$ e $B=5,5$).

Para uma melhor visualização do desvio do perfil de velocidades para a declividades de 8,7%, compara-se um perfil deste grupo com outro perfil de velocidades do grupo de declividade 5 % (figura 5.26).

As figuras 5.27 e 5.28 mostram os perfis de velocidades adimensionais de todos os testes realizados para as duas declividades trabalhadas.

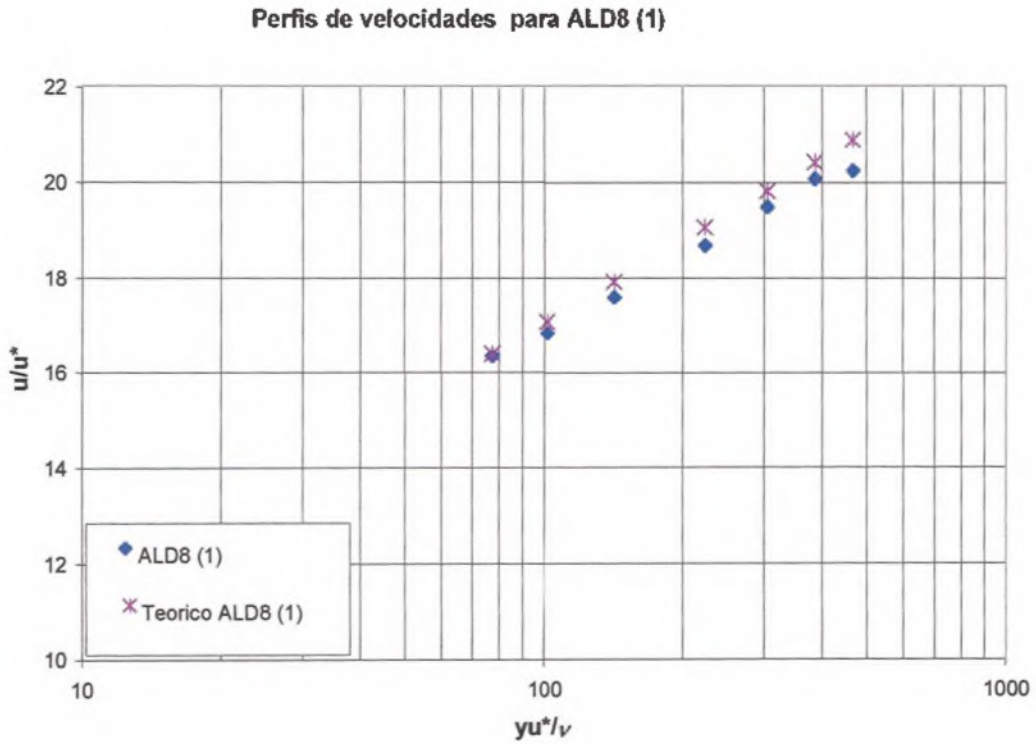


Figura 5.25. Gráfico comparativo entre os Perfis de velocidade experimental e teórico (lei da parede) para o teste ALD8 (1) para declividade 8,7 % .

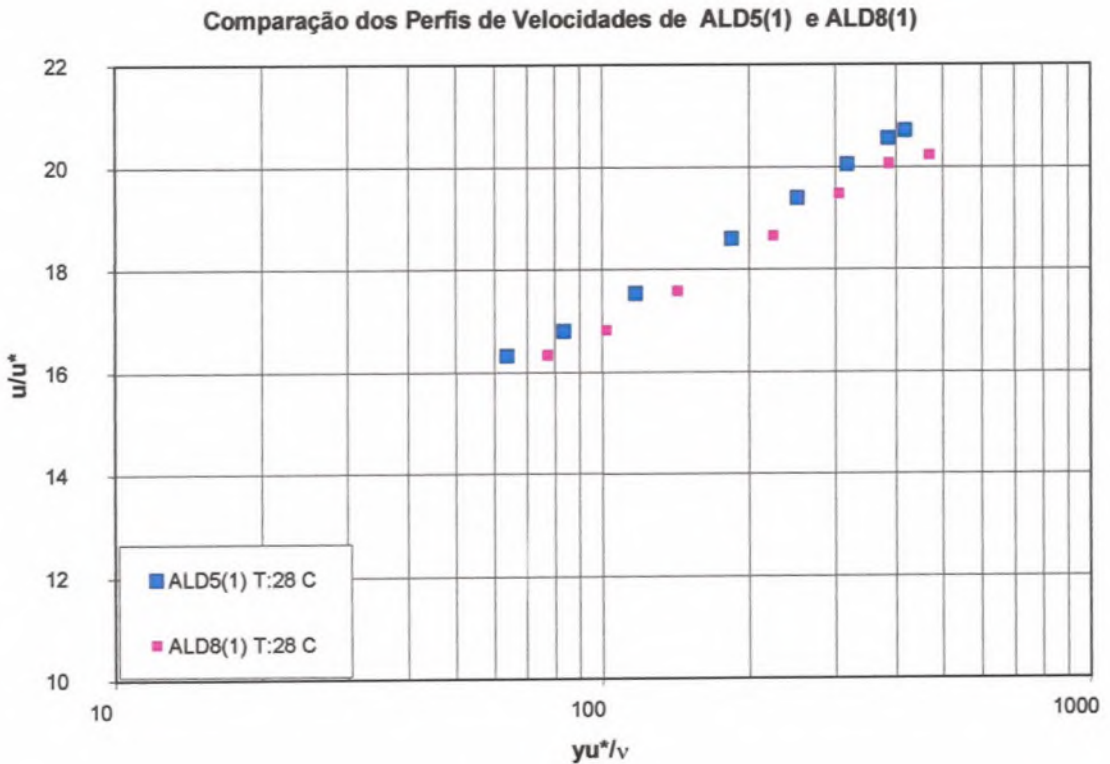


Figura 5.26. Comparação dos perfis de velocidade adimensional dos testes ALD5(1) e ALD8(1).

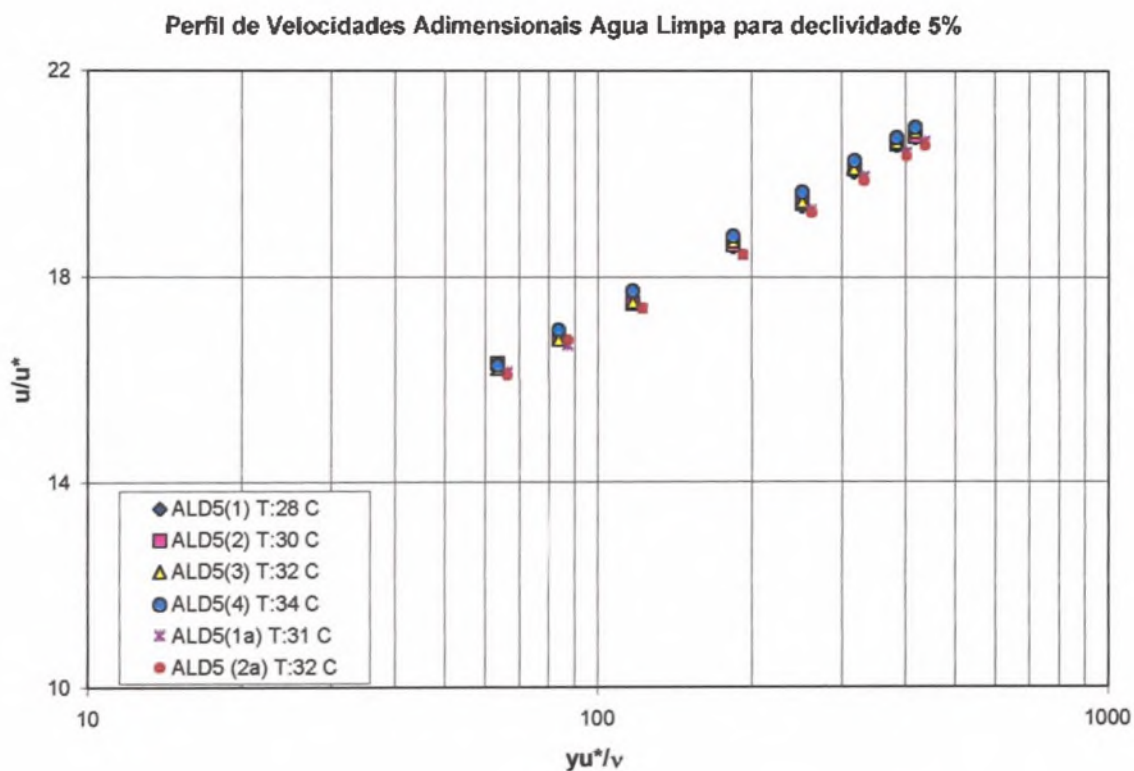


Figura 5.27. Perfis de velocidades experimentais adimensionalizadas para água limpa, declividade 5%.

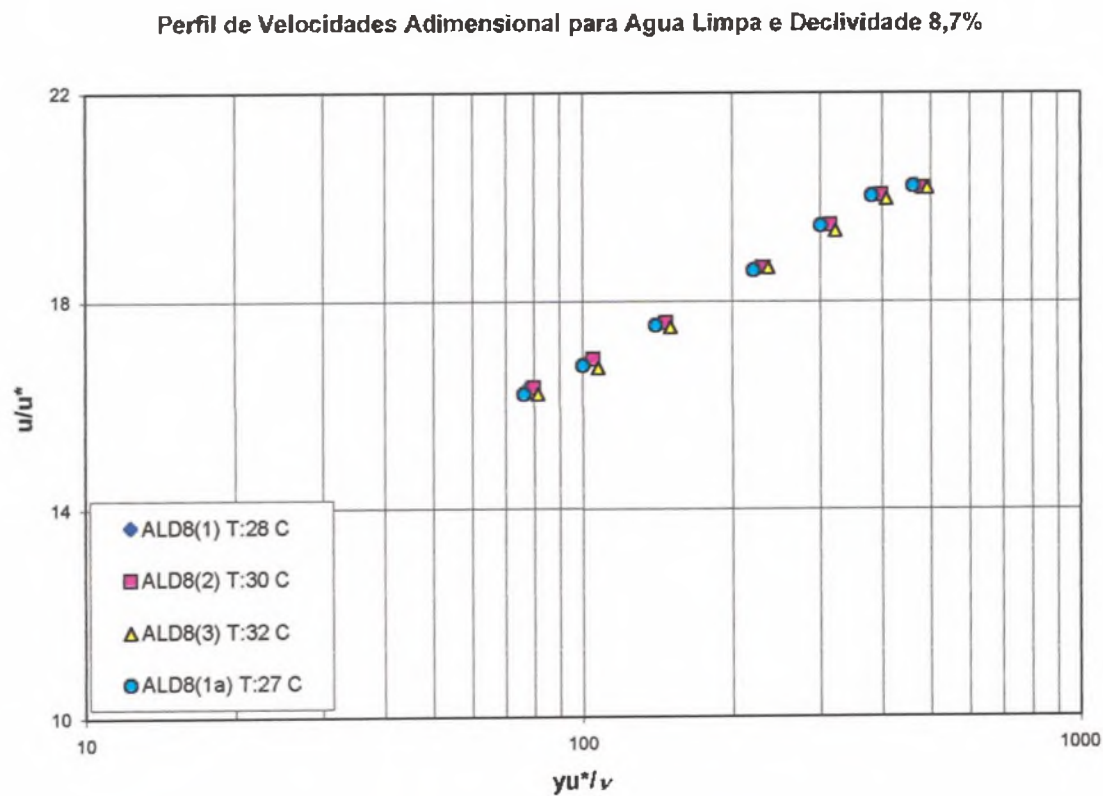


Figura 5.28. Perfis de velocidades experimentais adimensionalizadas para água limpa, declividade 8,7%.

Dentro da análise da aplicação da equação da parede na descrição do perfil de velocidades, foram calculados os coeficientes k e B da equação da lei da parede a partir dos dados experimentais para água limpa no presente trabalho.

Tabela 5.24. Resultados dos cálculos de k e B da lei da parede

Teste	Re_m	k	B	T °C
ALD5(1)	32342	0,394	5,400	28
ALD5(2)	33276	0,387	5,172	30
ALD5(3)	34036	0,385	5,143	32
ALD5(4)	34474	0,397	5,734	34
ALD5(1a)	33728	0,388	4,937	31
ALD5(2a)	34084	0,399	5,296	32
ALD8(1)	32945	0,430	6,077	28
ALD8(2)	33897	0,441	6,339	30
ALD8(3)	34671	0,428	5,836	32
ALD8(1a)	32228	0,425	5,937	27

O valor médio de k é 0,407, no caso de B é 5,587 (tabela 5.24). Esses valores são próximos aos obtidos por Nikuradse ($k=0,4$ e $B=5,5$) e Kirkgoz (1989), $k=0,41$ e $B=5,5$. Os valores de k e B foram recalculados unicamente com os testes de ALD3. Obteve-se um $k=0,39$ e $B=5,28$, sendo este último valor muito próximo aos sugeridos por Nezu e Rodi (1986), $k=0,412$ e $B=5,29$.

As figuras 5.29 e 5.30, para água limpa, fornecem uma idéia do bom funcionamento do sistema de medição de velocidade, apresentando a variação do coeficiente de Von Karman (k) e do coeficiente B para diferentes Reynolds (Re_m).

O comportamento dos valores de k e B com respeito a Re_m foi o mesmo encontrado por Nezu e Rodi (1986) sob o ponto de vista qualitativo. Isto é uma não dependência destes valores com respeito ao Re_m .

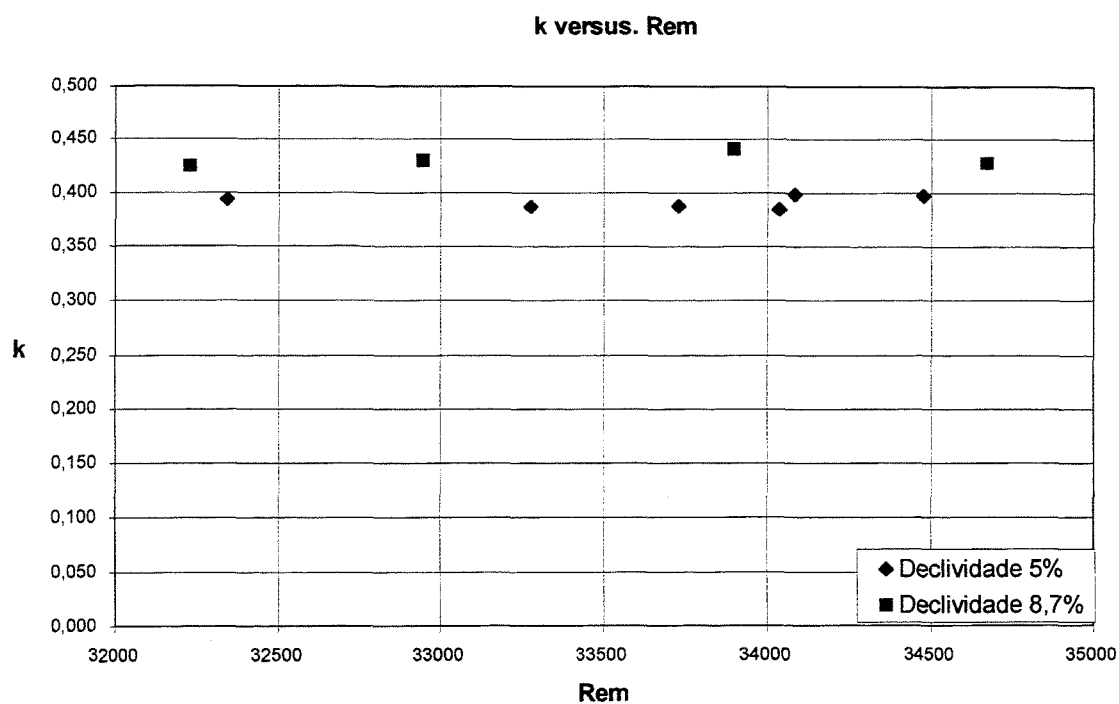


Figura 5.29 . Variação do coeficiente de Von Karman (k) com o Re_m para água limpa

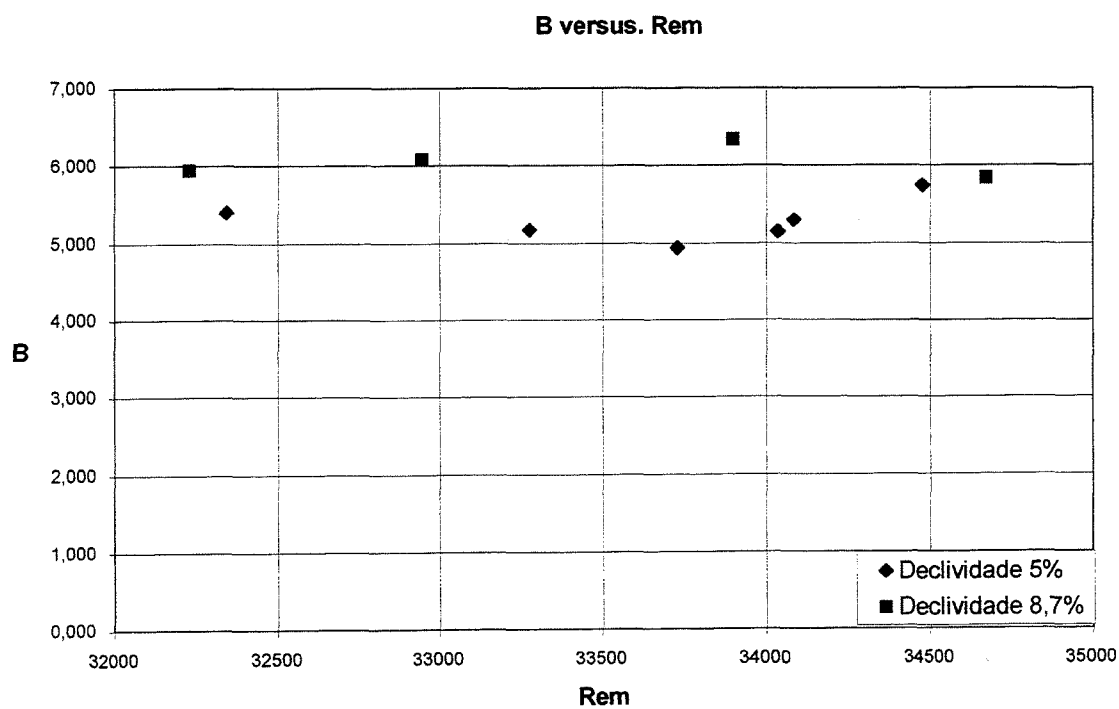


Figura 5.30 . Variação do coeficiente de B com o Re_m para água limpa

- Análise do perfil de velocidade empregando lei dos déficit de velocidade

A aplicação da equação 3.6 não será possível devido ao fato de que não se possui a velocidade (u_{\max}) do escoamento no ponto $y=h$. Para poder realizar os cálculos de k e Π toma-se como ponto de partida a equação 3.5 e realiza-se o mesmo procedimento do cálculo empregado para a equação 3.6; porém, ao invés de considerar o valor u_{\max} para $y=h$, emprega-se o maior valor de velocidade medido dentro do perfil de velocidade (u'_{\max}), numa altura y'_{\max} do escoamento menor que h . Então temos que $u_{\max} > u'_{\max}$ e $y'_{\max} < h$:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{u^* y}{v} + B + \frac{2\Pi}{k} \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) \quad (3.5)$$

Aplicando a equação 3.5 em dois pontos: y um ponto qualquer e o outro y'_{\max} , e tomando a diferença entre estes dois pontos temos a seguinte expressão:

$$\frac{u'_{\max} - u}{u^*} = \frac{1}{k} \left(\ln \frac{u^* y'_{\max}}{v} - \ln \frac{u^* y}{v} \right) + \frac{2\Pi}{k} \left[\operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi y'_{\max}}{2h}\right) - \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) \right] \quad (5.26)$$

$$\frac{u'_{\max} - u}{u^*} = \frac{1}{k} \left(\ln \frac{y'_{\max}}{y} \right) + \frac{2\Pi}{k} \left[\operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi y'_{\max}}{2h}\right) - \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) \right] \quad (5.27)$$

reagrupando a equação 5.27 de modo de obter uma equação linear onde as constantes da reta a determinar sejam k e Π , temos:

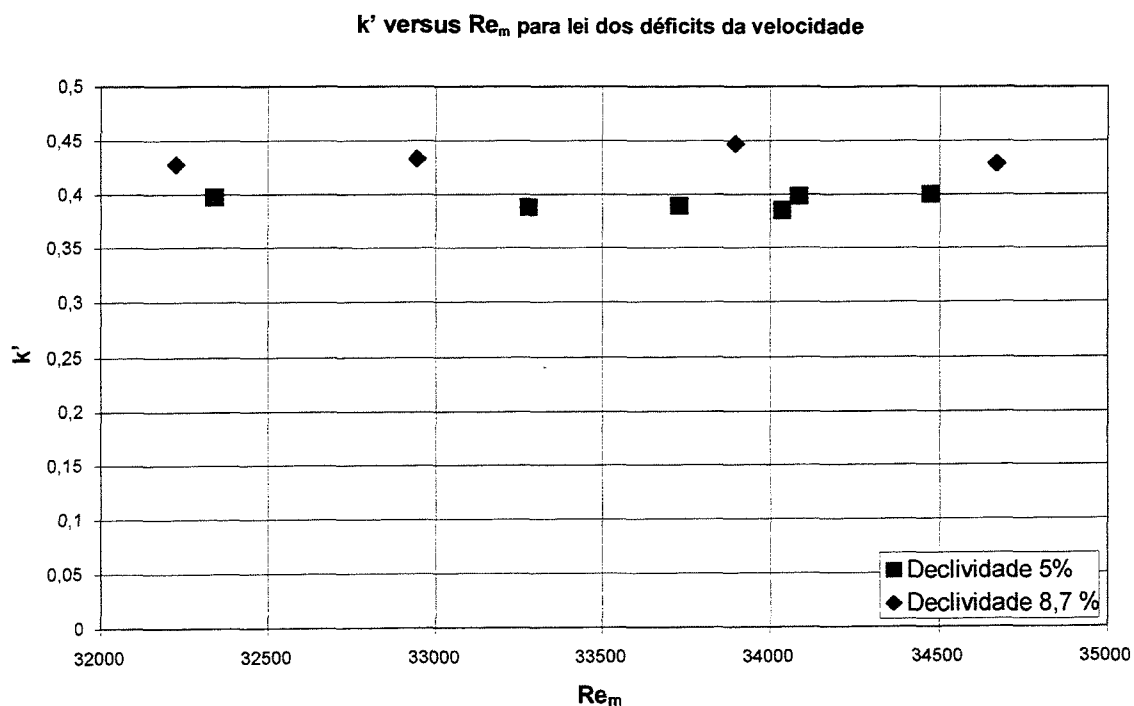
$$\frac{1}{2} \frac{\frac{u'_{\max} - u}{u^*}}{\left[\operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi y'_{\max}}{2h}\right) - \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) \right]} k - \Pi = \frac{1}{2} \frac{\ln\left(\frac{y'_{\max}}{y}\right)}{\left[\operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi y'_{\max}}{2h}\right) - \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi y}{2h}\right) \right]} \quad (5.28)$$

Deve-se lembrar que no processo de cálculo das constantes k e Π só foram considerados valores de velocidade para $y/h > 0,2$. Para efeitos de uma melhor identificação, a constante k , calculada a partir da equação 5.28, será denominada como k' .

Tabela 5.25. Resultados dos cálculos de k' e Π da lei dos déficits da velocidade

Teste	Re_m	k'	Π
ALD5(1)	32342	0,3976	0,0113
ALD5(2)	33276	0,3879	0,0251
ALD5(3)	34036	0,3842	-0,0019
ALD5(4)	34474	0,4000	0,0037
ALD5(1a)	33728	0,3890	0,0012
ALD5(2a)	34084	0,3982	0,0003
ALD8(1)	32945	0,4332	0,0724
ALD8(2)	33897	0,4466	0,0768
ALD8(3)	34671	0,4287	0,0671
ALD8(1a)	32228	0,4278	0,0683

Da tabela 5.25 se percebe-se que os valores médios para todos os testes considerados são $k'=0,4093$ e $\Pi=0,032$. Caso se considerar na análise unicamente os dados da declividade 5%, temos $k'=0,3928$ e $\Pi=0,0066$.

**Figura 5.31 .** Variação do coeficiente k' com o Re_m para água limpa

A figura 5.32 ilustra a variação de Π com o Re_m mostra valores de Π muito baixos nesta faixa de Re_m . Esse mesmo resultado é mostrado por Nezu e Rodi (1986).

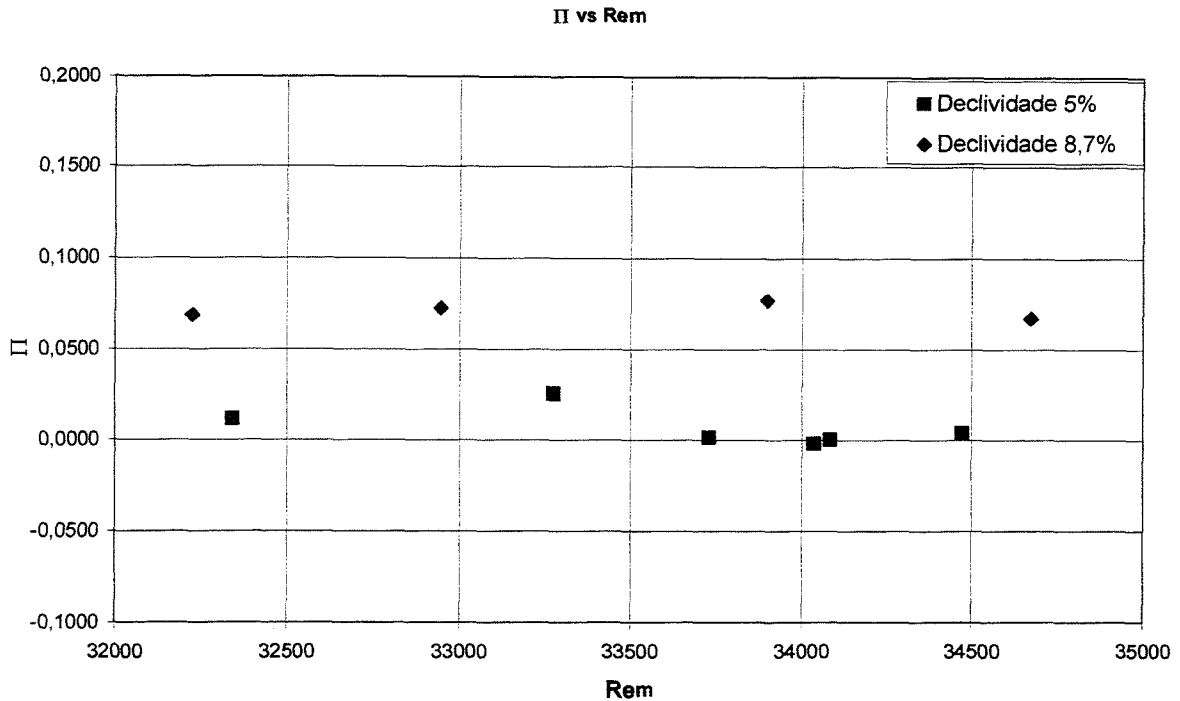


Figura 5.32 . Variação do coeficiente Π com o Re_m para água limpa

Comparando os resultados de k obtidos pela duas equações (lei da parede e lei dos déficits da velocidade), observa-se valores muito próximos (tabela 5.26).

Tabela 5.26. Comparação do valor do coeficiente de Von-Karman calculado pelas equações da lei da parede e dos déficits da velocidade

	k	
	Lei da parede	k' lei dos déficits da velocidade
Empregando só os dados dos testes de perfil de velocidade para declividade de 5%	0,390	0,392
Empregando dados de todos os testes de perfil de velocidade para as declividades de 5% e 8,7%	0,410	0,409

A seguir, as figuras 5.33 e 5.34 mostram os perfis de velocidade adimensionais para as declividades 5% e 8,7%, respectivamente. Deve-se destacar que esse tipo de adimensionalização, u/u^* e y/h , é empregado por Wang e Plate (1996) e tem a vantagem de permitir visualizar o comportamento do perfil de velocidade do escoamento sem ter que considerar as propriedades reológicas do fluido.

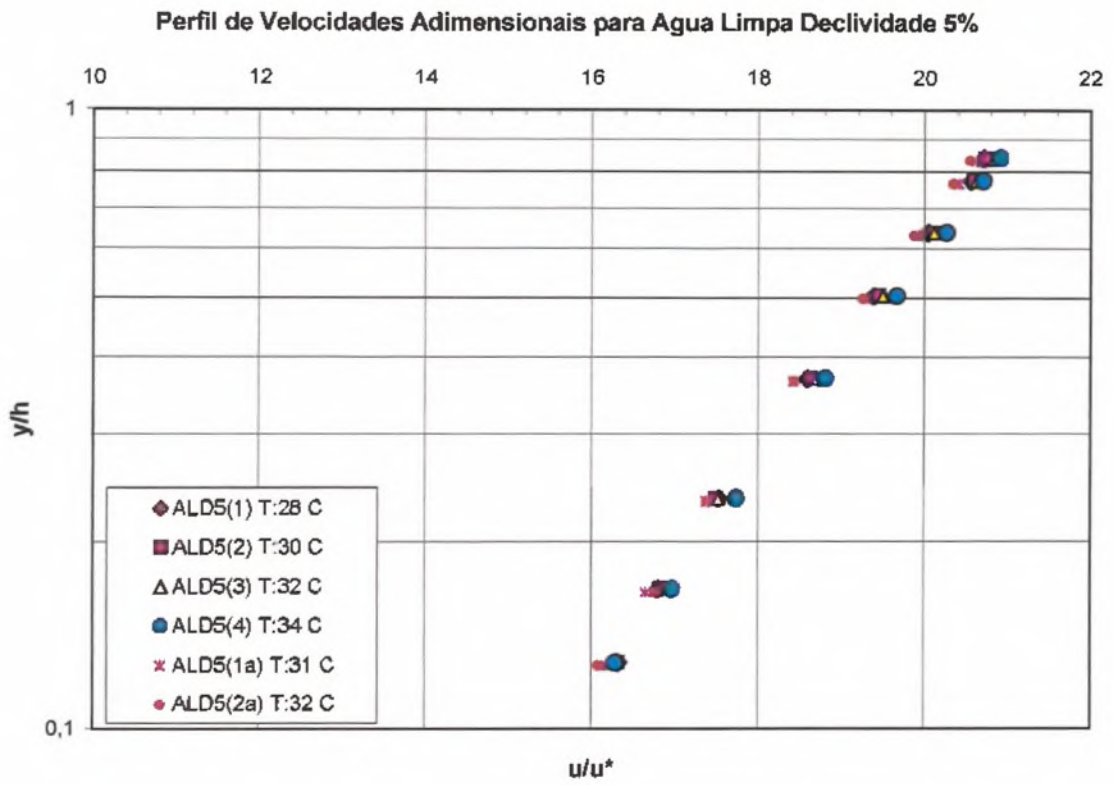


Figura 5.33 . Perfis de velocidade para água limpa e declividade 5%.

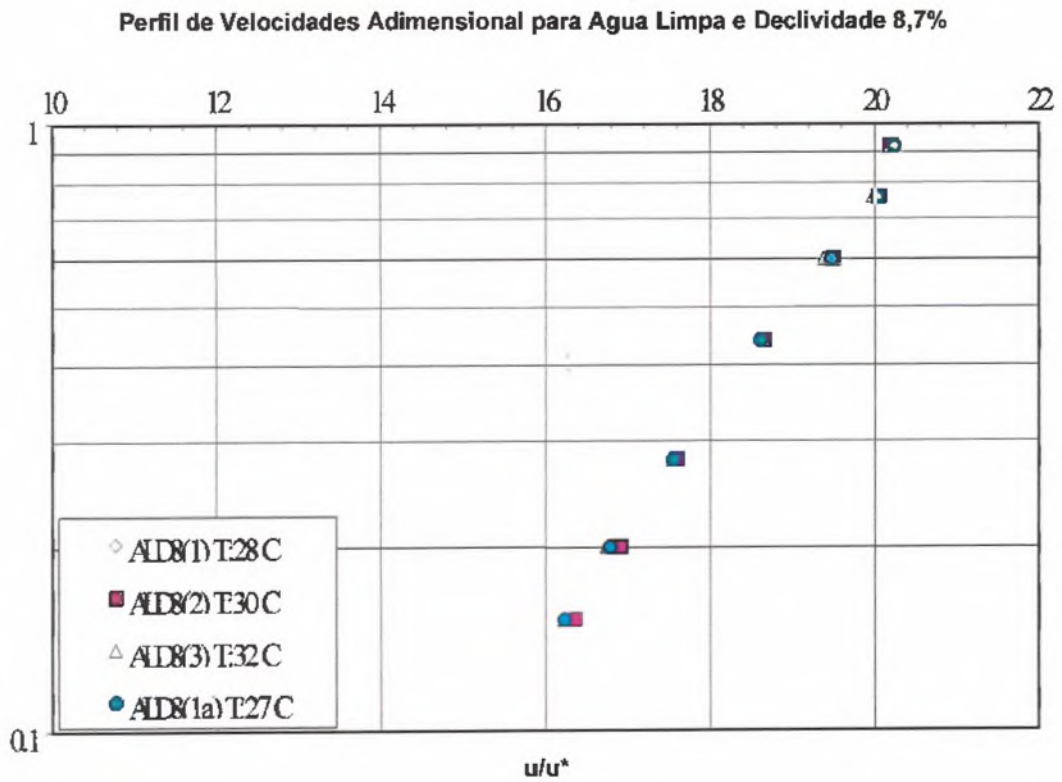


Figura 5.34 . Perfis de velocidade para água limpa e declividade 8,7%.

Os perfis de velocidades para a declividade 5% podem ser divididos em dois grupos,

considerando as diferentes datas de medição dos perfis. No primeiro grupo, temos ALD5(1) ALD5(2) ALD5(3) ALD5(4) e no segundo ALD5(1a) e ALD5(2a). Observa-se uma quase sobreposição dos valores para ambos grupos.

No caso dos perfis de velocidades para a declividade 8,7%, o primeiro grupo é formado por ALD8(1) ALD8(2) e ALD8(3) e o segundo por ALD8(1a). Neste caso, ambos os grupos apresentam sobreposição dos valores, demonstrando o bom desempenho temporal do equipamento.

5.5.5. Resultados do perfil de velocidade para um fluxo com sedimentos em suspensão

No início da pesquisa tentou-se estudar sedimento em suspensão considerando material fino e material grosso (AM, AF e AMF). Porém, devido à restrições econômicas, não foi possível adquirir uma bomba para este uso, sendo então utilizada uma bomba de água limpa. Por medidas de segurança retirou-se do experimento a classe areia média, a fim de proteger a estrutura interna da bomba, sabendo que a mesma não foi projetada para essas condições.

Para observar o efeito da concentração no perfil de velocidades, decidiu-se adimensionalizar as velocidades médias e a profundidade de medição. Como primeira opção de adimensionalização, trabalhou-se com os valores de u/u^* e yu^*/ν . Uma segunda opção de adimensionalização foi a mesma citada no item 5.5.3, com os valores u/u^* e y/h segundo Wang e Plate (1996). Como citado anteriormente, esse tipo de adimensionalização permite avaliar o efeito da concentração no perfil de velocidade sem levar em conta as propriedades reológicas do fluido, tal como a viscosidade cinemática.

A seguir se discutirá a forma de cálculo de cada uma das variáveis envolvidas nas duas formas de adimensionalização.

A variável u é velocidade média na profundidade y (figura 5.33). O procedimento do cálculo deste termo é o seguinte:

1. Repetir os passos de 1 a 4 da calibração estática do Pitot para água limpa.
2. Fazer leituras em diferentes profundidades para o escoamento com sedimento em circulação no canal. Tem-se leituras do paquímetro no eixo cc' em diferentes profundidades y e do piezômetro inclinado $L_{pi_dinamica\ com\ sedimento}$
3. Calcular a altura total no piezômetro inclinado:

$$H_{\text{total no piezômetro inclinado com sedimento}} = L_{pi_dinamica\ com\ sedimento} - 0_{pi} \quad (5.29)$$

4. Transformar esta altura inclinada em altura vertical empregando o ajuste linear existente:

$$H_{\text{total no piezômetro inclinado com sedimento}} \Rightarrow H_{\text{total vertical com sedimento}} \quad (5.30)$$

5. Determinar o equivalente do ponto Y no eixo da altura total vertical com sedimento (ponto A_v) e tomar este ponto como novo ponto de referência
6. Determinar x e calcular seu equivalente no eixo da altura total vertical com sedimento, isto é calcular x_s :

$$x_s = \frac{\rho_m}{\rho} x \quad (5.31)$$

7. Calcular a altura da velocidade equivalente no eixo da altura total vertical com sedimento:

$$h_{\text{velocidade_equivalente}} = H_{\text{totalvertical_com_sedimento}} - A_v - x_s \quad (5.32)$$

8. Cálculo da velocidade:

$$u_m = \sqrt{2g \frac{\rho}{\rho_m} h_{\text{velocidade_equivalente}}} \quad (5.33)$$

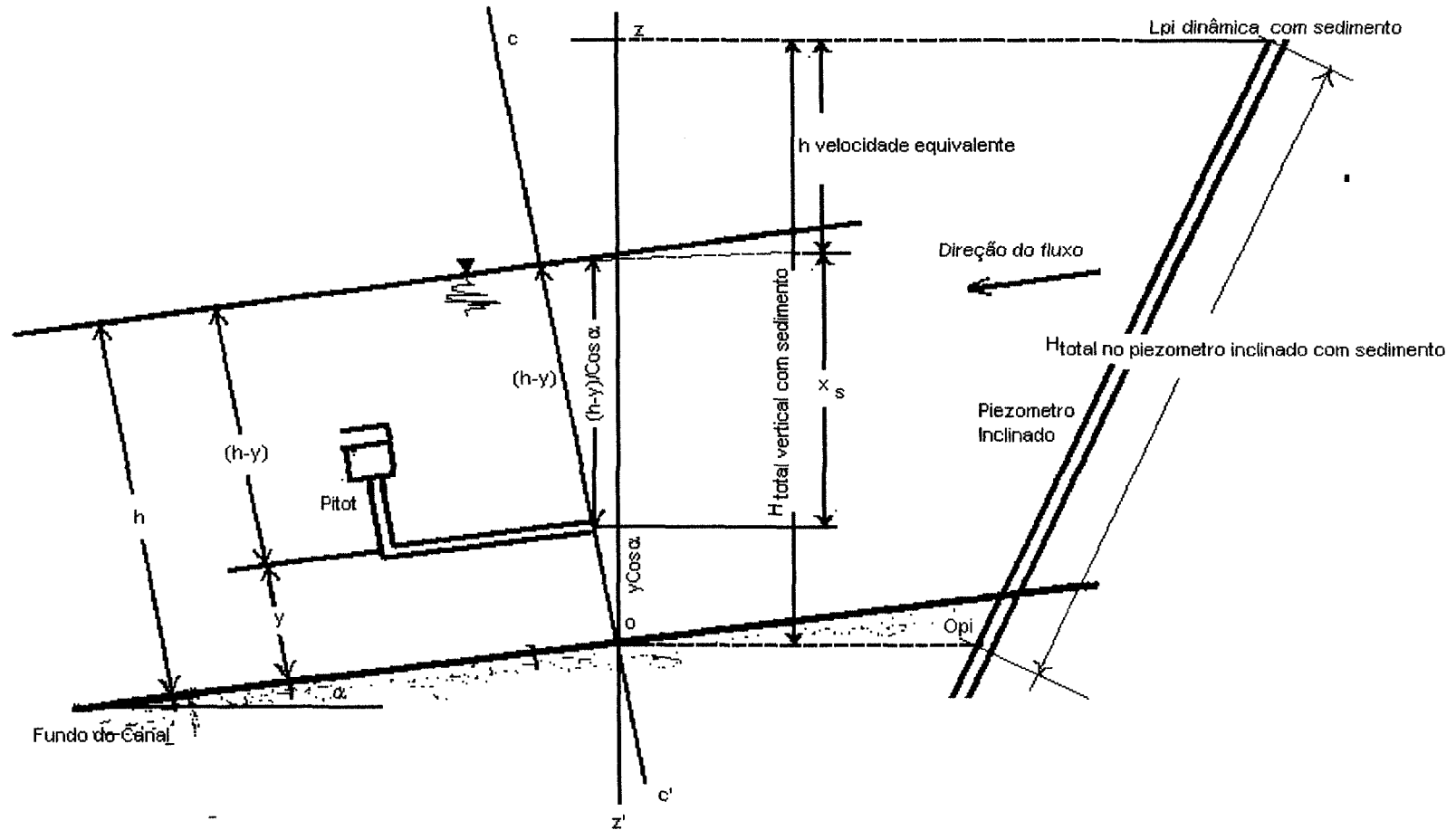


Figura 5.35. Cálculo do perfil de velocidade para escoamento com fluido de mistura água-sedimento em suspensão.

A variável u^* é a velocidade cisalhante e este valor pode ser calculada de modo independente das propriedades físicas do fluido e depende diretamente da declividade e da altura total da lâmina do escoamento, valores esses obtidos de maneira direta no experimento.

A variável ν é a viscosidade cinemática, a qual pode ser calculada de maneira teórica, ou por via experimental. Para o cálculo experimental da viscosidade cinemática são necessários os valores da massa específica do sedimento em suspensão (material grosso e fino) e da viscosidade dinâmica do fluido de mistura água-sedimento. A massa específica é obtida fazendo uma ponderação das massas específicas das classes existentes em cada amostra coletada do canal com as porcentagem de peso de material grosso e fino (anexo C). No caso do cálculo da viscosidade dinâmica, o procedimento consiste em construir uma curva de referência entre a viscosidade dinâmica e a concentração volumétrica para cada tipo de solo (como ilustrado na figura 5.6). Estabelecida uma determinada curva de concentração de teste no canal, é possível, mediante essa curva, inferir um valor de viscosidade dinâmica. Observa-se nos resumos das tabelas 5.30 e 5.32 que as concentrações dos solos Tr e V são diferentes das obtidas no experimento reológico do item 5.3.2 e os sedimentos em suspensão no canal, além de possuírem uma porcentagem de material fino, possuem outra de material grosso em suspensão (AF e AMF). Comprovou-se, porém, que essas porcentagens são baixas e seu efeito na viscosidade pôde ser desprezado. Decidiu-se, então, empregar os resultados das viscosidades dinâmicas dos testes reológicos (item 5.3.2) no cálculo de uma viscosidade aproximada para as concentrações presentes no canal para cada teste (tabela 5.27).

Tabela 5.27. Viscosidades calculadas por interpolação linear (solo Tr e V) e calculados pelo modelo Chu Junda (solo Bv).

Tr		V		Bv	
Cv Tabela 5.30 [%]	μ calculados interpolação linear [N.s/m ²]	Cv Tabela 5.32 [%]	μ calculados Interpolação linear [N.s/m ²]	Cv Tabela 5.28 [%]	μ calculados Modelo Chu Junda [N.s/m ²]
1,33	0,001166	1,56	0,00133	0,34	0,001034
1,23	0,001140	1,72	0,00137	0,51	0,001055
2,89	0,001585	4,25	0,00203	1,35	0,001160
2,82	0,001567	4,10	0,00199	1,09	0,001115
5,97	0,002412				
5,91	0,002394				

Para o caso do solo Bv, a diferença é bastante considerável, além do que, a percentagem de material grosso é significativo. Neste caso, decidiu-se empregar uma fórmula do modelo Chu Junda (eq. 3.10) para o cálculo da viscosidade.

Os resultados neste parte do texto serão apresentados considerando o tipo de solo. Ao final, serão apresentados os resultados originados de uma análise global de dados.

- Solo Bv

A tabela 5.28 apresenta o resumo das condições hidráulicas do conjunto de testes para o solo tipo Bv. O termo da viscosidade cinemática foi calculado a partir dos dados da massa específica do fluido de mistura e da viscosidade dinâmica, calculada na tabela 5.27 (modelo Chu Junda).

Tabela 5.28. Resumo dos testes realizados para solo Bv

Teste	S	Cv	Q	h	u*	U	v	Rem	T
	[%]	[%]	[l/s]	[mm]	[m/s]	[m/s]	[m ² /s]		°C
Bv1	5,0	0,34	1,061	8,55	0,0606	1,0346	1,033E-06	29994	29
Bv2	5,0	1,09	1,076	8,95	0,0618	1,0019	1,101E-06	28344	29
Bv3	8,7	0,51	1,039	6,80	0,0721	1,2734	1,051E-06	29602	26
Bv4	8,7	1,35	1,060	7,05	0,0733	1,2528	1,161E-06	27220	26

Esperava-se que as concentrações dos pares de testes (Bv1 e Bv3) e (Bv2 e BV4) fossem aproximados. No entanto, foram observadas diferenças entre eles. Uma explicação para esse comportamento é devido à grande percentagem de material grosso nesse tipo de solo, o que causa deposição de parte do sedimento em suspensão no fundo do reservatório do sistema fechado do canal de declividade variável.

A seguir são apresentados (figura 5.36) os perfis de velocidade para um escoamento com declividade 5%. Observa-se que as curvas correspondentes a escoamentos com maior concentração volumétrica tendem a ficar abaixo das curvas de menor concentração. No gráfico foram plotados o perfil de velocidade para água limpa, teste ALD5(1) e o perfil de velocidade calculado de forma teórica aplicando a equação da lei da parede para as mesmas condições do teste ALD5(1). Estas curvas representam os perfis de velocidade para concentração volumétrica $C_v=0$ e servem como base comparativa com os outros perfis onde a concentração volumétrica é superior a zero.

Os perfis de velocidade para água limpa obtidos de forma experimental e teórica (lei da parede) serão mostrados daqui em diante em todos os gráficos de visualização de perfis de velocidade para todos os tipos de solo e em ambas declividades escolhidas (5% e 8,7%).

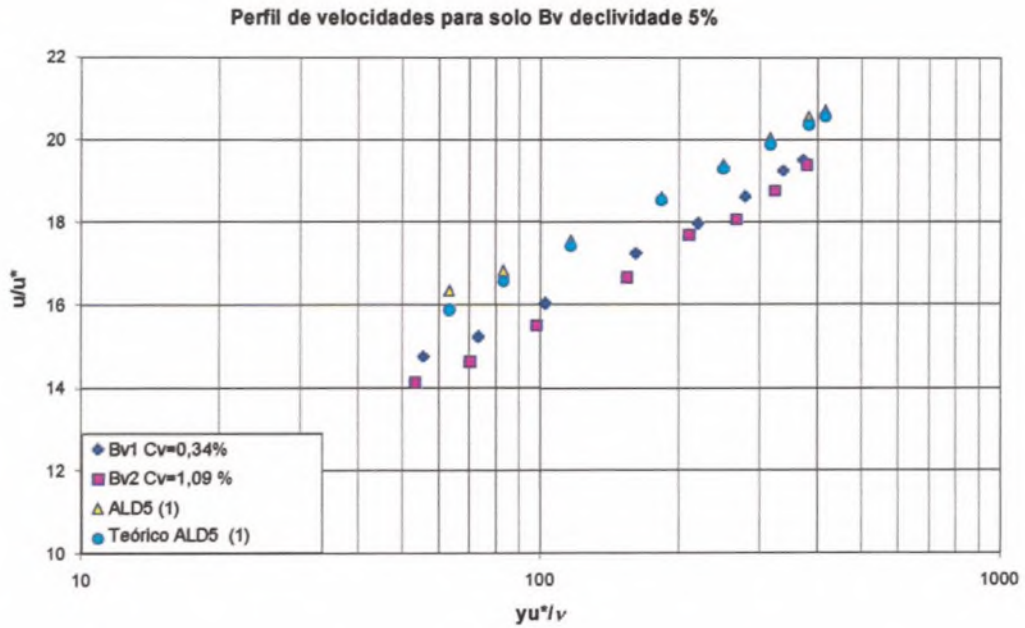


Figura 5.36. Perfis de velocidades: teórico ALD5 (1) (lei da parede), água limpa ALD5 (1), Bv1 com $Cv=0,34$ e Bv2 com $Cv=1,09$. Solo tipo Bv e declividade 5%.

Na figura 5.37 temos o escoamento com uma declividade de 8,7%. De modo similar ao observado na figura 5.36 os perfis de velocidades adimensionais de maior concentração se encontram sob as curvas de água limpa. Esse decaimento dos perfis de velocidade com o aumento da concentração foi também observado por Coleman (1986).

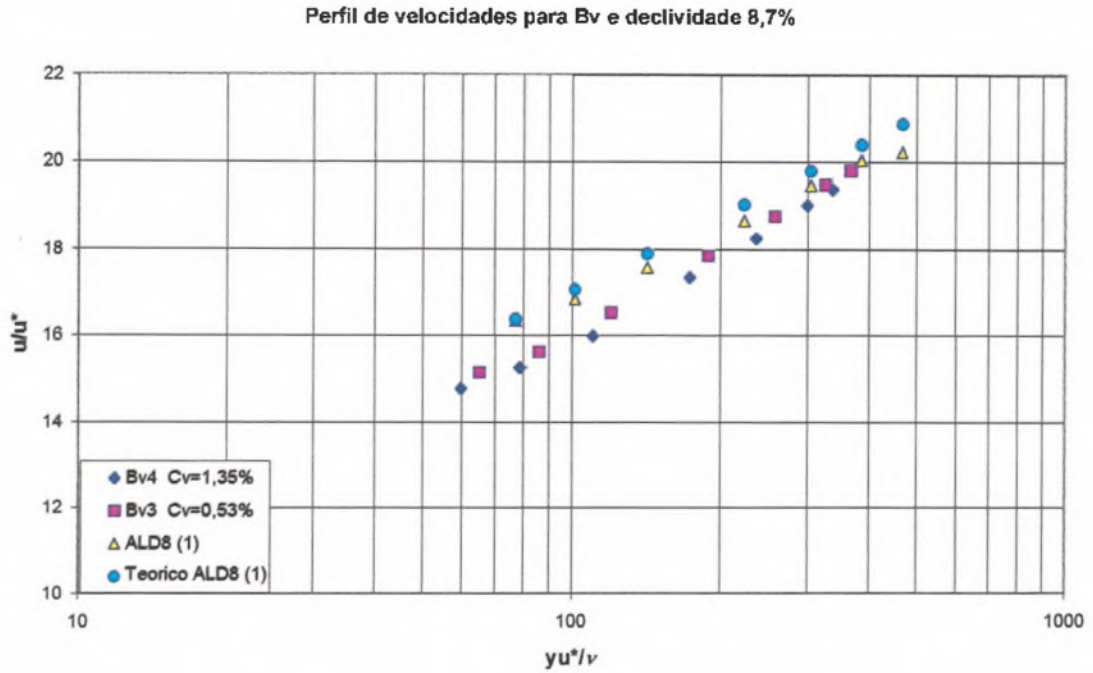


Figura 5.37. Perfis de velocidades adimensionais: teórico ALD8 (lei da parede), água limpa ALD5(1), Bv3 Cv=0,51 e Bv4 Cv=1,35 para solo tipo Bv e declividade 8,7%.

A figura 5.38 mostra os perfis de velocidades para solo Bv com declividade de 5%, adimensionalizados de tal forma que não considere os efeitos de mudança da viscosidade cinemática. Observa-se o deslocamento do grupo dos perfis de velocidade com sedimento em suspensão para o lado esquerdo dos perfis teórico e experimental para ALD5(1) em água limpa. Na figura 5.39 também é observado esse comportamento.

Na tabela 5.29 são apresentados os coeficientes calculados das equações da lei da parede e dos déficits da velocidade. Também são apresentadas as concentrações volumétricas e os Re_m . A coluna de Π apresenta valores negativos da diferença dos valores positivos obtidos na água limpa.

Tabela 5.29. Resumo dos coeficientes calculados para as equações da lei da parede e dos déficits da velocidade

Amostra	Cv [%]	S [%]	Rem	k	B	k'	Π	T °C
Bv1	0,34	5,0	29994	0,371	3,498	0,368	-0,0188	29
Bv2	1,09	5,0	28344	0,354	2,473	0,341	-0,0678	29
Bv3	0,51	8,7	29602	0,338	2,369	0,345	-0,0229	26
Bv4	1,35	8,7	27220	0,330	1,706	0,331	-0,0703	26

Fazendo uma comparação entre as colunas dos coeficientes k , B , k' e Π e a coluna da concentração volumétrica se observa que com o aumento da concentração existe uma diminuição dos valores desses coeficientes.

Do ponto de vista físico, as diminuições dos valores do coeficiente de Von Karman (calculados pela equação da parede, k , ou equação dos déficits da velocidade, k') com o aumento da concentração representam um aumento das declividades das curvas (figuras 5.36 e 5.37). As mudanças dos valores B , são produzidas pelas mudanças das declividades das retas, isto é, uma mudança do ponto de intercepção (figuras 5.36 e 5.37). O termo Π expressa um fator de ajuste da equação dos déficits da velocidade que neste caso, devido à pouca espessura do escoamento, o seu valor possui conotação apenas compensadora.

Analisando na tabela 5.28 as colunas de vazão e altura de escoamento para os testes Bv1 e Bv2, observa-se que para Bv1 a vazão foi $Q= 1,061$ l/s e a altura do escoamento $h=8,55$ mm e para o teste Bv2 temos $Q= 1,076$ l/s e $h=8,95$ mm, obtendo-se 1,5% de erro relativo entre as duas vazões e 5% para as alturas de escoamento aproximadamente. Isto significa que o aumento da concentração de sedimento não modificou de maneira significativa a vazão do escoamento, mas representou um aumento da altura do escoamento e, conseqüentemente, uma diminuição da velocidade média. Então, no momento de realizar uma comparação do perfil de velocidade entre um escoamento com água limpa e outro com sedimento em suspensão, os valores u/u^* para um mesmo ponto y/h tenderão a ser maiores nos escoamentos com água limpa do que escoamentos com sedimento em suspensão pelo fato de que o valor da velocidade cisalhante u^* na água limpa é menor do que no escoamento com sedimento, devido à variação da altura de escoamento com o incremento do sedimento em suspensão.

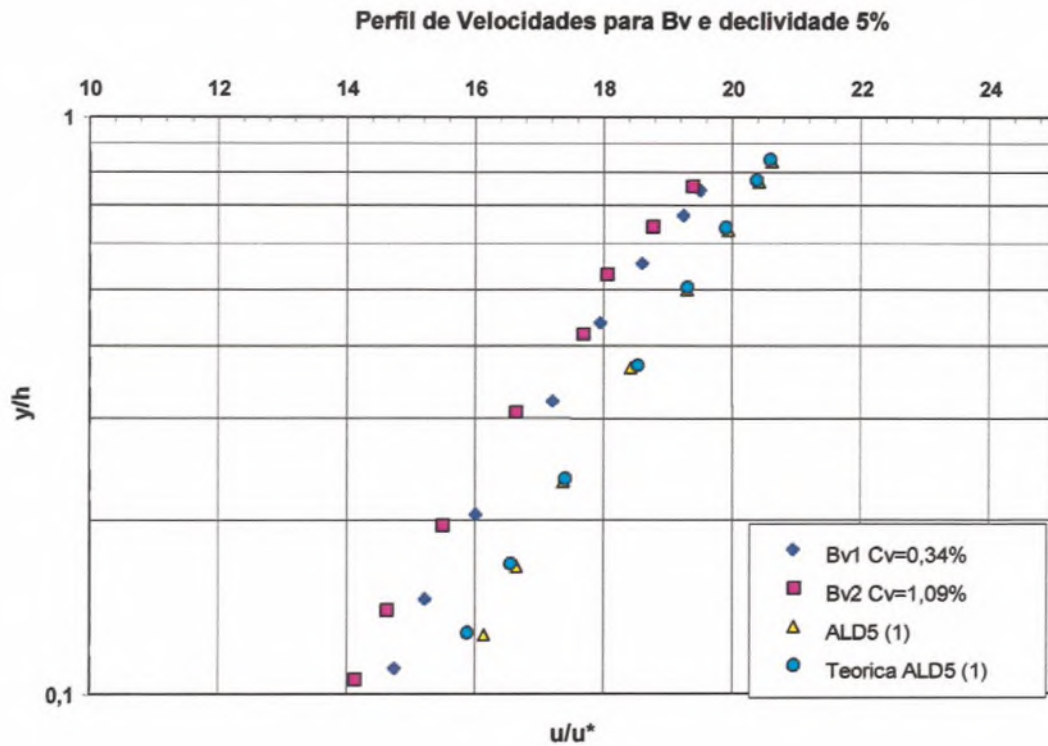


Figura 5.38. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD3 (1) (lei da parede), água limpa ALD3 (1), Bv1 com $C_v = 0,34\%$ e Bv2 com $C_v = 1,09\%$ para solo tipo Bv (declividade 5%).

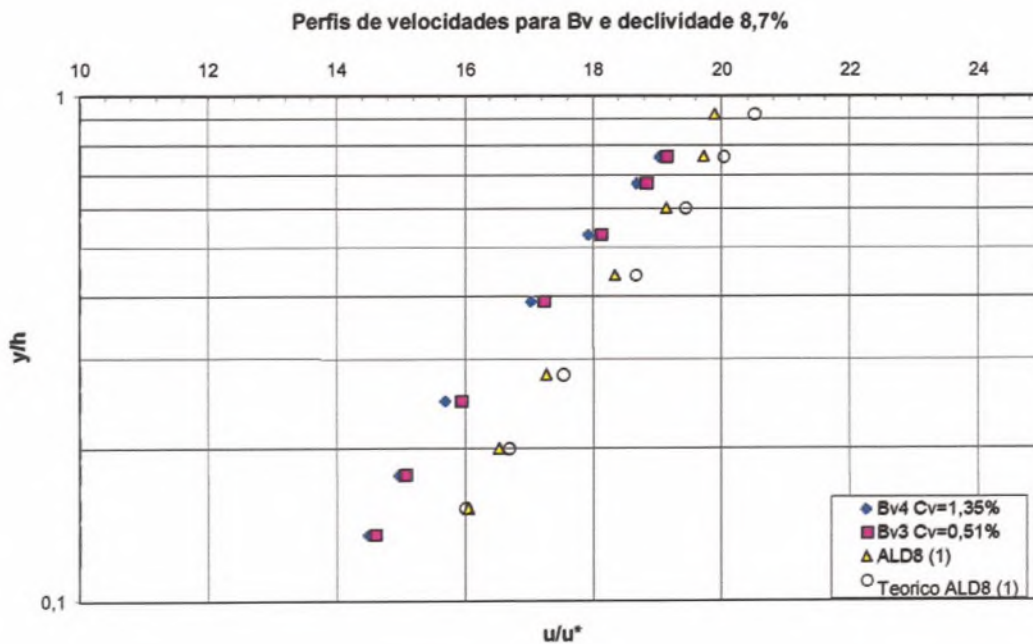


Figura 5.39. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD8 (1) (lei da parede), água limpa ALD5 (1), Bv1 com $C_v = 0,51\%$ e Bv2 com $C_v = 1,35\%$ para solo tipo Bv (declividade 8,7 %).

- *Solo Tr*

A tabela 5.30 apresenta o resumo das condições hidráulicas do conjunto de testes para o solo tipo Tr. O termo da viscosidade cinemática foi calculado a partir dos dados da massa específica do fluido de mistura e da viscosidade dinâmica apresentados na tabela 5.27.

Tabela 5.30. Resumo de todos os testes realizados para solo Tr

Amostra	S [%]	Cv [%]	Q [l/s]	h [mm]	u* [m/s]	U [m/s]	ν [m ² /s]	Rem	T °C
Tr1	5,0	1,23	0,925	7,75	0,0580	0,9950	1,122E-06	24351	28
Tr2	5,0	1,23	0,925	7,75	0,0580	0,9950	1,122E-06	24351	30
Tr3	5,0	2,89	0,897	7,55	0,0574	0,9904	1,520E-06	17483	33
Tr4	5,0	5,96	0,973	8,30	0,0598	0,9768	2,203E-06	12933	28
Tr5	8,7	1,33	1,000	6,60	0,0711	1,2625	1,146E-06	26213	30
Tr6	8,7	1,33	1,000	6,60	0,0711	1,2625	1,146E-06	26213	32
Tr7	8,7	2,82	0,915	6,35	0,0699	1,2011	1,502E-06	18372	26
Tr8	8,7	5,97	1,012	6,70	0,0716	1,2589	2,203E-06	13775	30

As figuras 5.40 e 5.41 mostram os perfis de velocidades adimensionalizados (para os valores u/u^* e yu^*/ν) para esse tipo de solo. Ao contrário do observado nas figuras 5.36 e 5.37, as retas correspondentes a escoamento com maior concentração de sedimentos em suspensão são localizadas na parte superior esquerda dos perfis de água limpa ($Cv=0$), enquanto que as retas de maior concentração do solo BV estão na parte inferior direita do perfil água limpa ($Cv=0$). Uma explicação desse comportamento diferenciado está no valor da viscosidade cinemática empregada no termo yu^*/ν . Os valores ν medidos para o solo Tr são muito maiores aos calculados (Modelo Chu Junda) no solo Bv, e os valores altos de ν originaram um deslocamento da reta para o lado esquerdo. Conclui-se que o cálculo correto da viscosidade cinemática determina um correto cálculo do coeficiente B, seja aplicando a lei da parede ou a lei do defeito da velocidade.

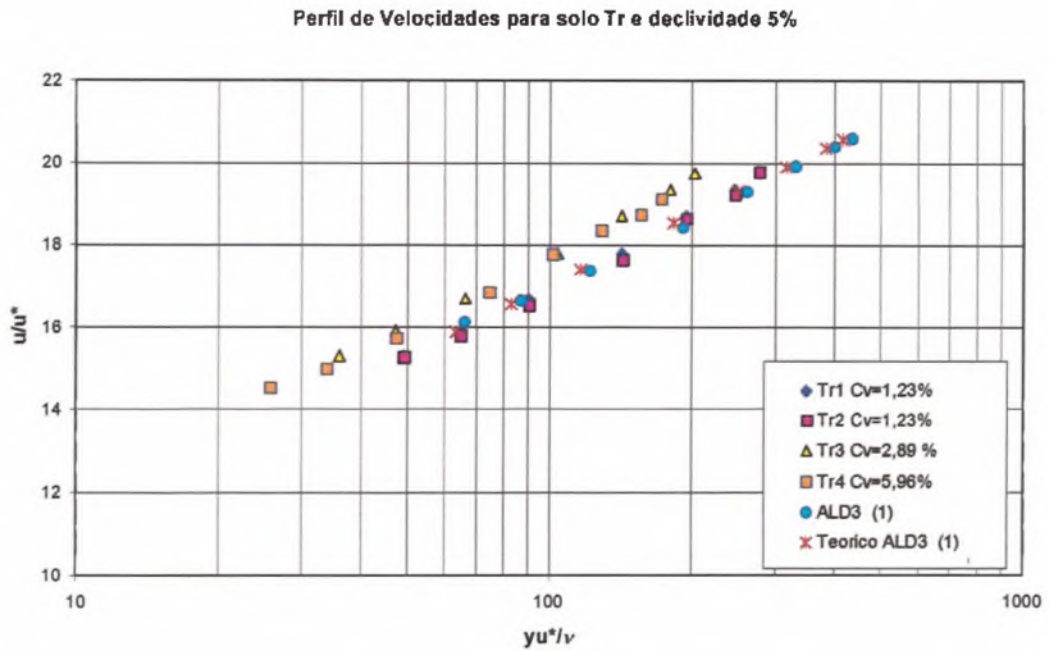


Figura 5.40. Perfis de velocidades adimensionais: teórico ALD5(1) (lei da parede), experimental ALD5(1), Tr1 com Cv=1,23%, Tr2 com Cv=1,23%, Tr3 com Cv=2,89% e Tr4 com Cv=5,96% para solo tipo Tr e declividade 5%.

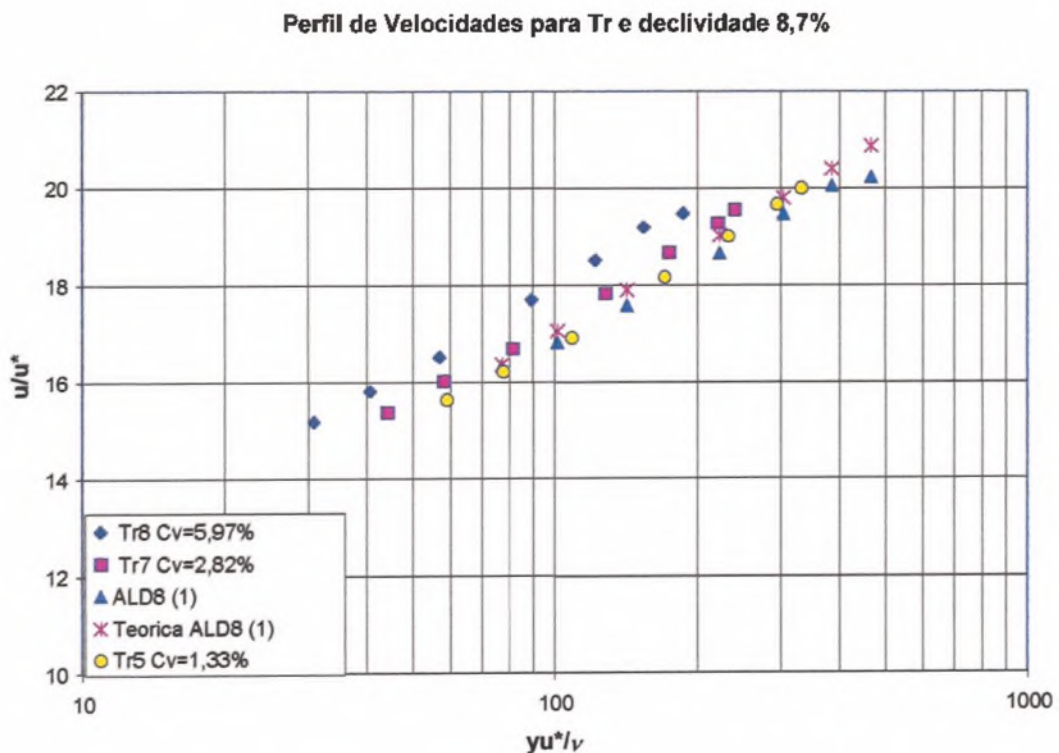


Figura 5.41. Perfis de velocidades adimensionais: teórico ALD8(1) (lei da parede), experimental ALD8%, Tr 5 com Cv=1,33, Tr7 com Cv=2,82 e Tr8 com Cv=5,97% para solo Tr e declividade 8,7 %.

Na tabela 5.31 pode-se verificar que os valores dos coeficientes k , B , k' aumentam com o acréscimo da concentração volumétrica. Para Π não existe uma tendência definida com o aumento da concentração.

Do ponto de vista físico, o aumento dos valores do coeficiente de Von Karman (calculados pela equação da parede, k , ou equação dos déficits da velocidade, k') com o aumento da concentração, representa uma diminuição das declividades das curvas (figuras 5.40 e 5.41). O aumento dos valores B são produzidos pelas mudanças das declividades das retas, isto é, uma mudança do ponto de intercepção (figuras 5.40 e 5.41). Como foi mencionado anteriormente, o termo Π expressa um fator de ajuste da equação dos déficits da velocidade que neste caso, devido à pouca espessura do escoamento, o seu valor possui conotação apenas compensadora dentro da equação.

Tabela 5.31. Resumo dos coeficientes calculados para as equações da lei da parede e dos déficits da velocidade para solo Tr

Amostra	C_v [%]	S [%]	Rem	k	B	k'	Π	T °C
Tr1	1,23	5,0	24351	0,365	4,304	0,350531	-0,06197	28
Tr2	1,23	5,0	24351	0,350	3,555	0,324177	-0,11133	30
Tr3	2,89	5,0	17483	0,379	5,381	0,377728	-0,02245	33
Tr4	5,96	5,0	12933	0,383	5,639	0,377999	-0,03013	28
Tr5	1,33	8,7	26213	0,363	4,019	0,384848	-0,05124	30
Tr6	1,33	8,7	26213	0,366	4,091	0,382115	-0,03717	32
Tr7	2,82	8,7	18372	0,379	5,066	0,402494	-0,07235	26
Tr8	5,97	8,7	13775	0,394	6,304	0,415193	0,020355	30

A seguir são apresentadas as figuras 5.42 e 5.43 que ilustram os perfis de velocidades adimensionalizados (com os valores u/u^* e y/h). Os resultados demonstram um comportamento similar ao observado no estudo do solo Bv: deslocamento dos perfis de velocidade com maior concentração ao lado esquerdo do perfil $C_v=0$.

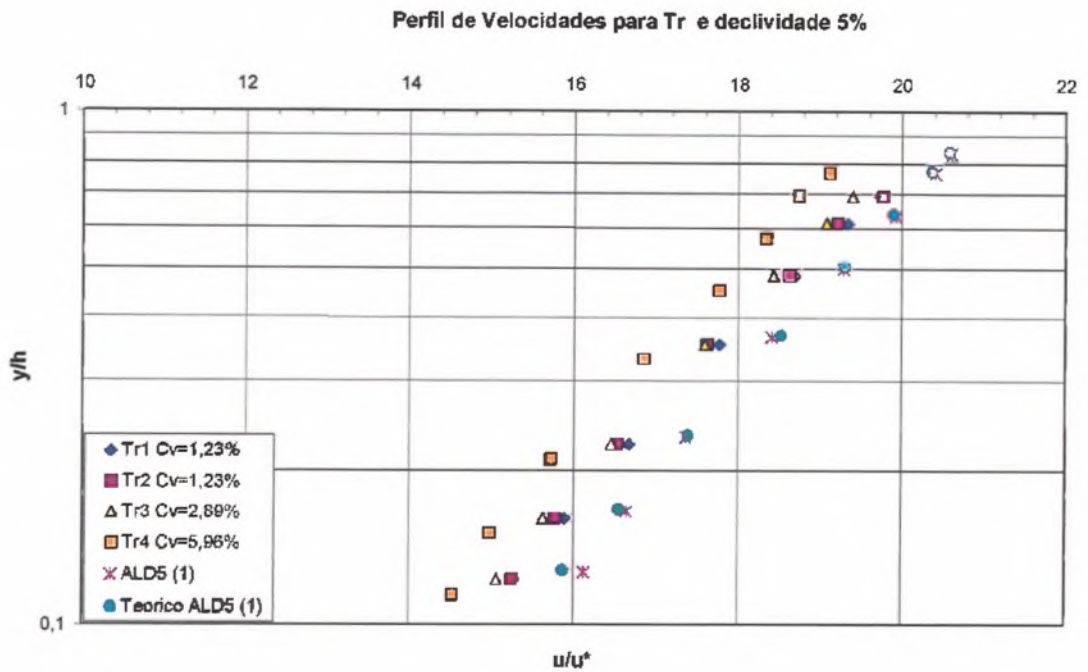


Figura 5.42. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD5 (1), água limpa ALD5 (1) com $C_v=0$, Tr1 com $C_v=1,23$, Tr2 com $C_v=1,23\%$, Tr3 com $C_v=2,89\%$ e Tr4 com $C_v=5,96\%$ para solo tipo Tr e declividade 5%

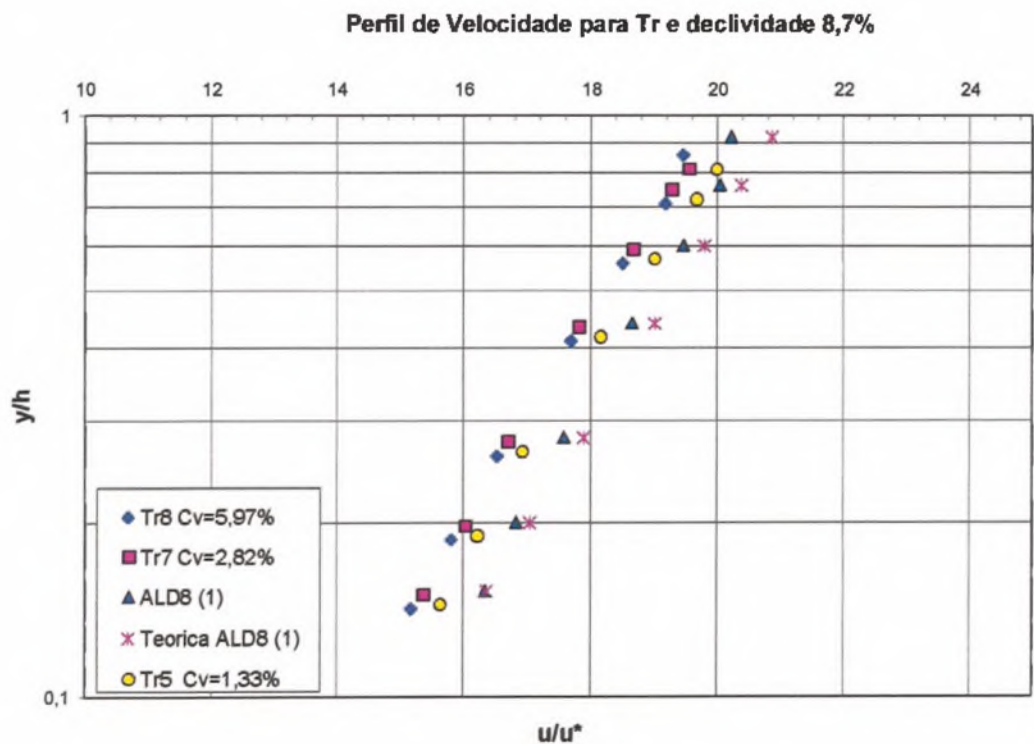


Figura 5.43. Perfis de velocidades adimensionalizados: teórica ALD8 (1) (lei da parede), água limpa ALD8 (1), Tr5 com $C_v=1,33\%$, Tr7 com $C_v=2,82\%$ e Tr8 com $C_v=5,97\%$ para solo tipo Tr e declividade 8.7 %.

- *Solo V*

A tabela 5.32 apresenta o resumo das condições hidráulicas do conjunto de testes para o solo tipo V. O termo da viscosidade cinemática foi calculado a partir dos dados da massa específica do fluido de mistura e da viscosidade dinâmica apresentados na tabela 5.27.

As figuras 5.44 e 5.45 mostram os perfis de velocidades adimensionalizados (para os valores u/u^* e yu^*/ν). O comportamento observado é similar ao observado nas figuras 5.40 e 5.41, as retas correspondentes a perfis de velocidade de maior concentração de sedimentos em suspensão são localizadas na parte superior esquerda dos perfis de água limpa ($C_v=0$), como foi constatado na análise dos testes do solo Tr. Atribui-se este comportamento ao valor da viscosidade cinemática empregada no termo yu^*/ν , os valores ν medidos com material extraídos dos vertissolos (V) são muito maiores aos calculados (Modelo Chu Junda) no solo Bv.

Tabela 5.32. Resumo de todos os testes realizados para solo V

Amostra	S	C _v	Q	h	u*	U	ν	Rem	T
	[%]	[%]	[l/s]	[mm]	[m/s]	[m/s]	[m ² /s]		°C
V1	5,0	1,56	0,861	7,15	0,0560	1,0030	1,310E-06	19563	28
V2	5,0	1,56	0,861	7,15	0,0560	1,0030	1,310E-06	19563	29
V3	5,0	1,56	0,861	7,15	0,0560	1,0030	1,310E-06	19563	30
V4	5,0	1,56	0,861	7,15	0,0560	1,0030	1,310E-06	19563	31
V5	5,0	4,25	1,027	8,25	0,0596	1,0369	1,931E-06	15582	28
V6	5,0	4,25	1,027	8,25	0,0596	1,0369	1,931E-06	15582	29
V7	5,0	4,25	1,027	8,25	0,0596	1,0369	1,931E-06	15582	30
V8	5,0	7,22	0,792	7,20	0,0562	0,9167	3,701E-06	6369	30
V9	5,0	7,22	0,792	7,20	0,0562	0,9167	3,701E-06	6369	32
V10	8,7	1,72	0,863	6,05	0,0684	1,1887	1,349E-06	19369	27
V11	8,7	1,72	0,863	6,05	0,0684	1,1887	1,349E-06	19369	28
V12	8,7	1,72	0,863	6,05	0,0684	1,1887	1,349E-06	19369	30
V13	8,7	4,1	0,901	6,25	0,0694	1,2019	1,897E-06	14344	27
V14	8,7	4,1	0,901	6,25	0,0694	1,2019	1,897E-06	14344	28
V15	8,7	4,1	0,901	6,25	0,0694	1,2019	1,897E-06	14344	30
V16	8,7	4,1	0,932	6,50	0,0706	1,1947	1,898E-06	14764	30
V17	8,7	4,1	0,932	6,50	0,0706	1,1947	1,898E-06	14764	31
V18	8,7	6,86	0,885	6,15	0,0689	1,1997	3,716E-06	7203	30
V19	8,7	6,86	0,885	6,15	0,0689	1,1997	3,716E-06	7203	31

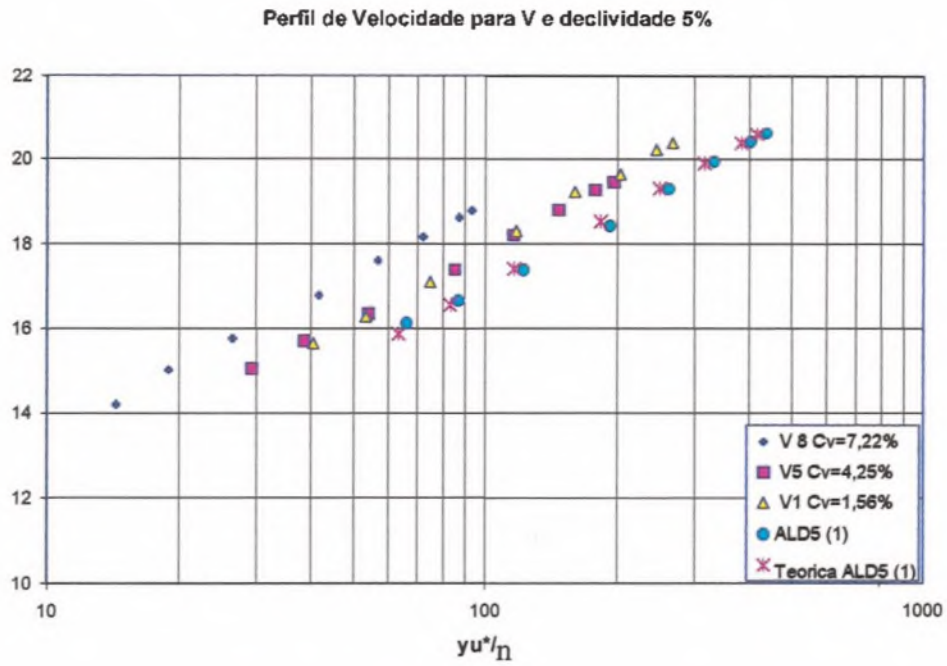


Figura 5.44. Perfis de velocidades adimensionalizados: teórico ALD5 (1) (lei da parede), água limpa ALD5 (1)), V1 com $C_v=1,56\%$, V5 com $C_v=4,25\%$ e V8 com $C_v=7,22\%$ para solo tipo V e declividade 5%

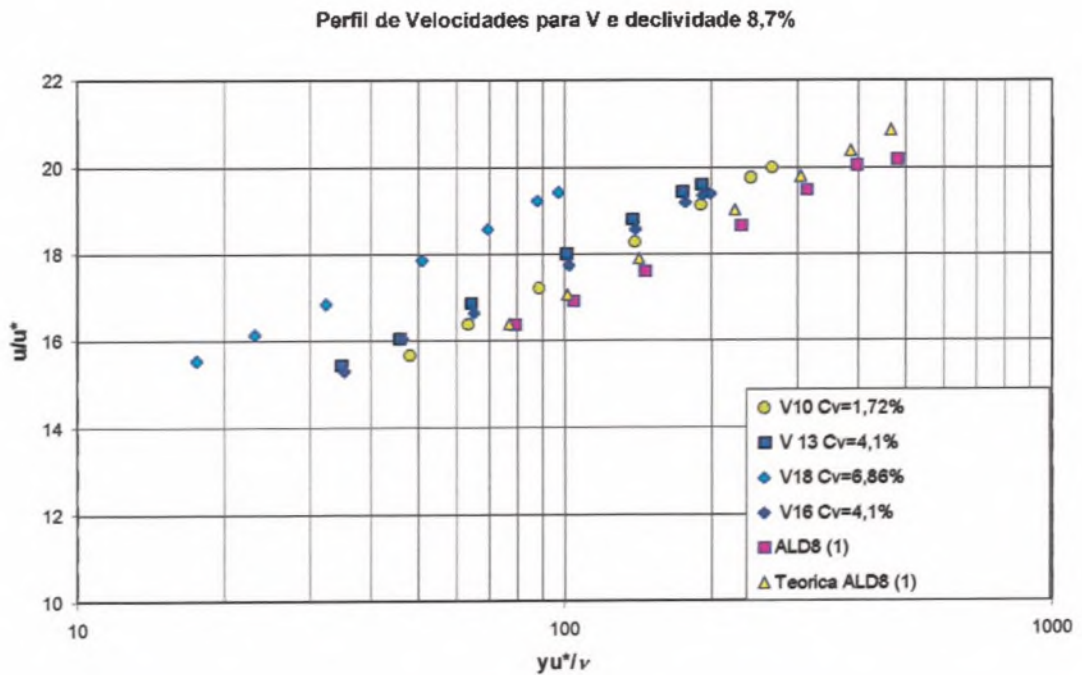


Figura 5.45. Perfis de velocidades adimensionalizados: teórica ALD8 (1) (lei da parede), água limpa ALD8 (1), V10 com $C_v=1,72\%$, V13 e V16 com $C_v=4,1\%$ e V18 com $C_v=6,86\%$ para solo tipo V e declividade 8,7 %.

Tabela 5.33. Resumo dos coeficientes calculados para as equações da lei da parede e dos déficits da velocidade para solo V

Amostra	Cv [%]	S [%]	Rem	k	B	k'	Π	T °C
V1	1,56	5,0	19563	0,362	5,307	0,361441	0,011791	28
V2	1,56	5,0	19563	0,384	5,884	0,379739	0,064889	29
V3	1,56	5,0	19563	0,375	5,527	0,369595	0,037153	30
V4	1,56	5,0	19563	0,389	6,063	0,382899	0,024841	31
V5	4,25	5,0	15582	0,381	5,646	0,382441	-0,03001	28
V6	4,25	5,0	15582	0,409	6,649	0,41651	0,028037	29
V7	4,25	5,0	15582	0,408	6,539	0,414701	0,010574	30
V8	7,22	5,0	6369	0,429	8,112	0,430532	0,005115	30
V9	7,22	5,0	6369	0,413	7,802	0,416645	-0,00905	32
V10	1,72	8,7	19369	0,394	5,816	0,395804	-0,00046	27
V11	1,72	8,7	19369	0,399	6,055	0,403267	0,033064	28
V12	1,72	8,7	19369	0,396	5,960	0,396884	0,044071	30
V13	4,1	8,7	14344	0,394	6,312	0,39756	0,013298	27
V14	4,1	8,7	14344	0,411	6,944	0,41685	-0,0322	28
V15	4,1	8,7	14344	0,414	7,029	0,419822	-0,01215	30
V16	4,1	8,7	14764	0,415	6,676	0,422041	-0,06106	30
V17	4,1	8,7	14764	0,414	6,622	0,421296	-0,03667	31
V18	6,86	8,7	7203	0,431	8,793	0,435537	-0,01457	30
V19	6,86	8,7	7203	0,430	8,760	0,434562	-0,04617	31

Na tabela 5.33 pode-se verificar que os coeficientes k , B , k' crescem com o aumento da concentração volumétrica. Para Π não existe uma tendência definida com o aumento da concentração. De forma similar ao observado no solo Tr, o aumento dos valores do coeficiente de Von Karman (calculados pela equação da parede, k , ou equação dos déficits da velocidade, k') com o aumento da concentração representa uma diminuição das declividades das curvas (figuras 5.44 e 5.45). O aumento dos valores B são produzidos pelas mudanças das declividades das retas, isto é, uma mudança do ponto de intercepção (figuras 5.44 e 5.45). O termo Π , expressa um fator de ajuste da equação dos déficits da velocidade que neste caso, devido à pouca espessura do escoamento, o seu valor possui uma conotação apenas compensadora dentro da equação.

A seguir são apresentadas as figuras 5.46 e 5.47 que ilustram os perfis de velocidades adimensionalizados (com os valores u/u^* e y/h). Os resultados demonstram um comportamento similar aos observados nos estudos dos solos Bv. Tr. Deslocamento dos perfis de velocidade

com maior concentração ao lado esquerdo do perfil $C_v=0$.

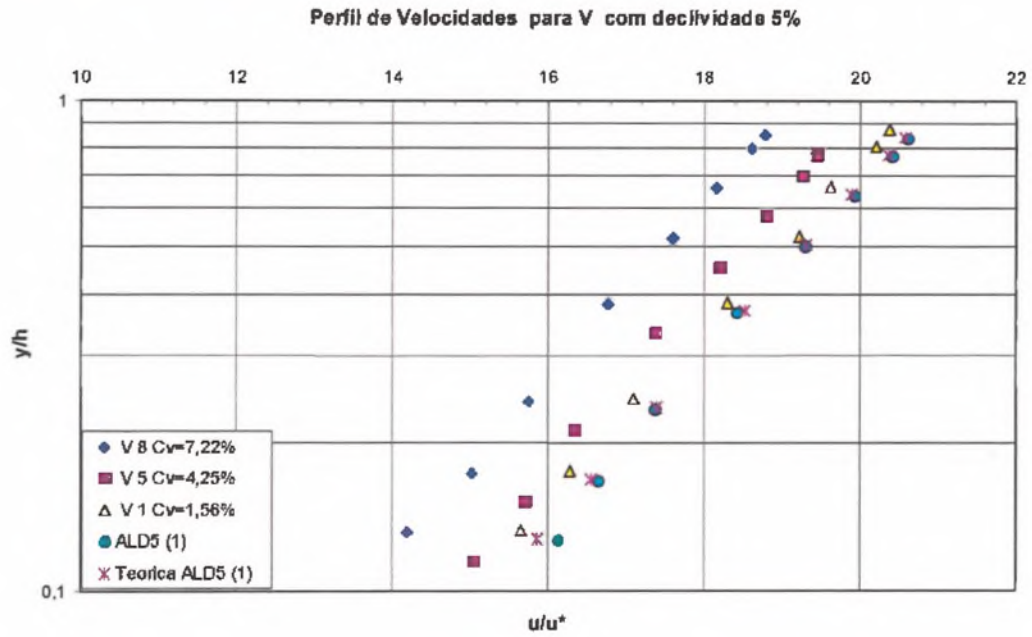


Figura 5.46. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD3 (1) (lei da parede), água limpa ALD5 (1), V1 com C_v 1,56%, V5 com $C_v=4,25\%$ e V8 com $C_v=7,22\%$ para solo tipo V e declividade 5%.

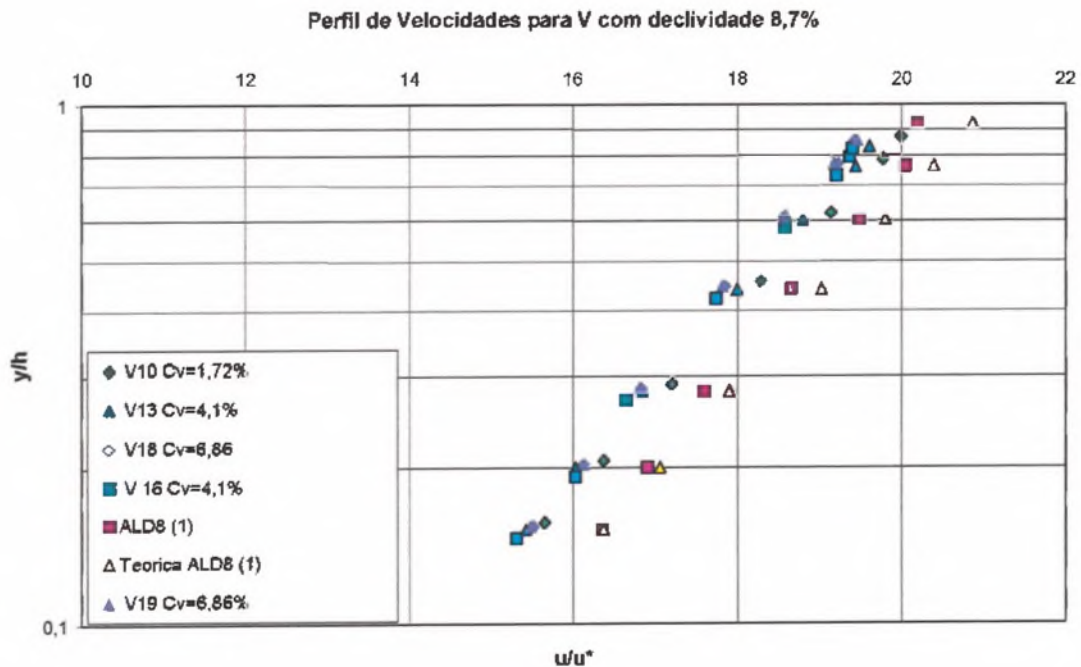


Figura 5.47. Perfis de velocidades adimensionais: teórica ALD8 (1) (lei da parede), água limpa ALD5 (1), V10 com C_v 1,72%, V13 e V16 com $C_v=4,1\%$ e V18 com $C_v=6,86\%$ para solo tipo V, declividade 8,7%.

- Análise em conjunto dos resultados para os três tipos de solo Bv, Tr e V

A figura 5.48 mostra os diferentes comportamentos de k (lei da parede) em função da concentração volumétrica. Dessa figura, pode-se observar que o solo Bv apresenta um k que tende a diminuir com o aumento de C_v . No caso dos solos Tr e V o comportamento é contrário, existe um aumento de k com o incremento da concentração. Observa-se que os valores de k para o solo V são um pouco superiores aos valores do solo Tr. Um resultado interessante deste gráfico é que todos os valores k para as menores concentrações nos três tipos de solo são menores do k calculado para água limpa. Para os solos Tr e V, o incremento C_v permite que os valores de k superem ou se equiparem aos k de água limpa.

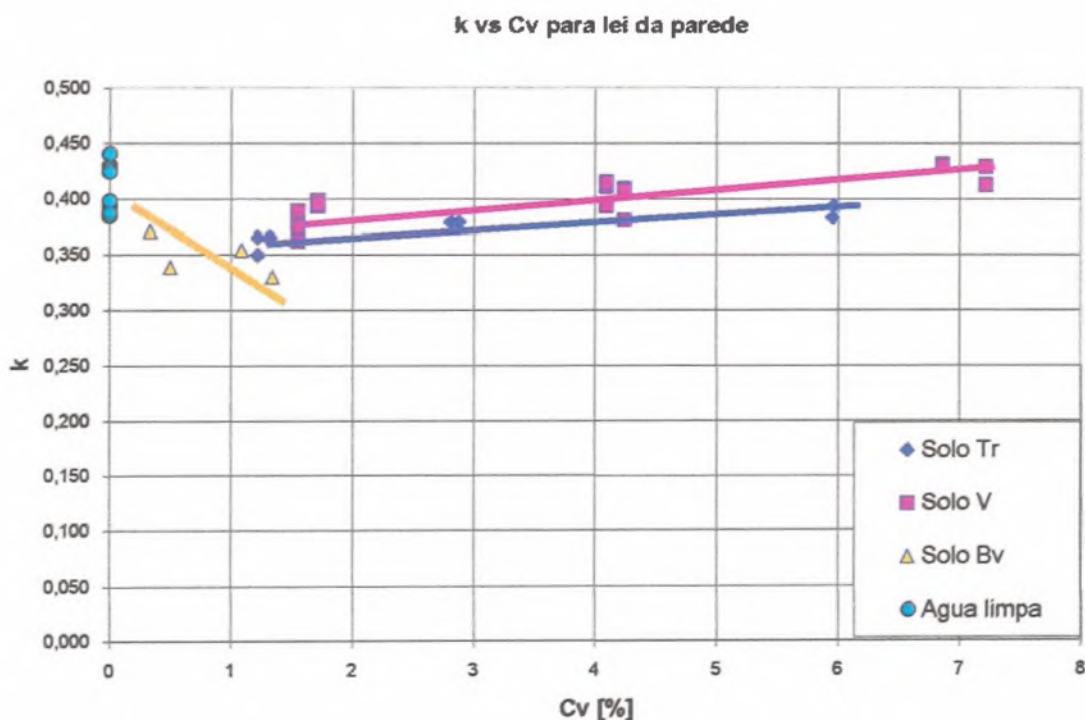


Figura 5.48. Variação de k (lei da parede) com respeito a concentração volumétrica C_v para os três tipos de solo Bv, Tr e V.

Uma análise do ponto de vista das características do sedimento, permite observar dois tipos de comportamentos: k diminuindo com a concentração, para material com características arenosa siltosa (solo Bv), mostrando que a declividade do perfil de velocidade (expresso em termos de u/u^* e $y u^*/\nu$) aumenta com a concentração; e k aumentando com a concentração,

para o material com uma grande porcentagem de silte e argila (solos Tr e V), mostrando que a declividade do perfil de velocidade (expresso em termos de u/u^* e yu^*/ν) diminui com a concentração.

Outra análise sob o ponto de vista mineralógico, permite constatar que os dois solos argilosos, Tr e V, apresentam comportamentos similares. Porém, se observa no solo V (esmectítico), um maior aumento dos valores de k com o aumento da concentração, em comparação com os valores de k obtidos no solo Tr (caulinitico). Em outras palavras, o efeito da concentração sobre o perfil de velocidade (expresso em termos de u/u^* e yu^*/ν) representa um maior diminuição da declividade do perfil de velocidade no caso do solo V que do apresentado no solo Tr.

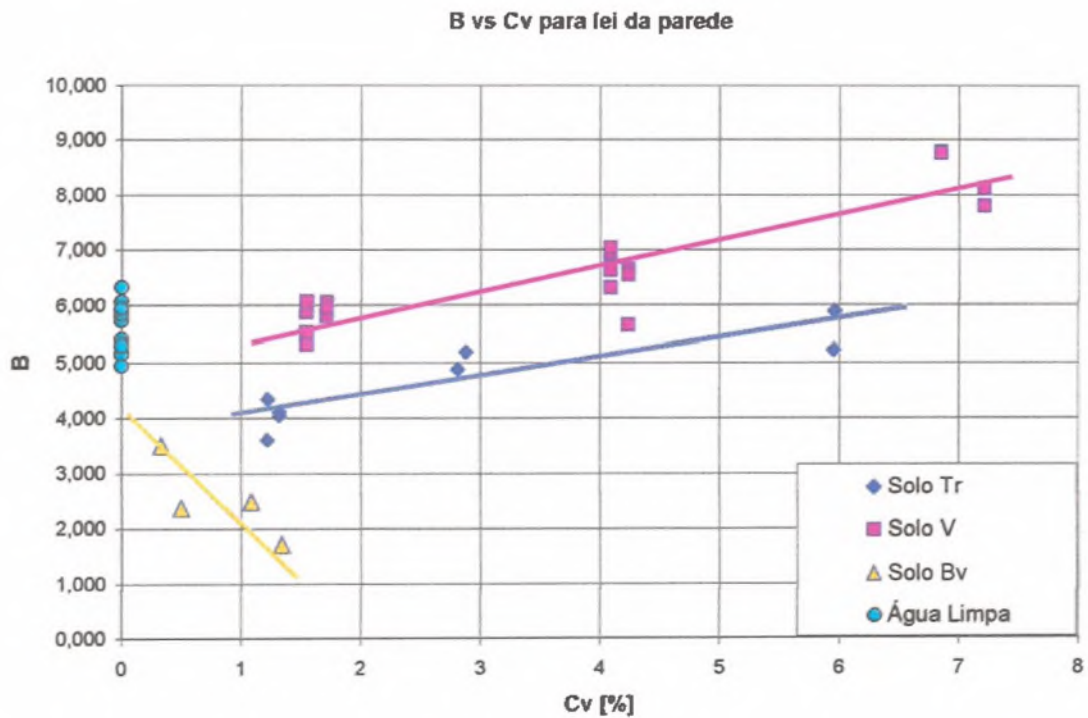


Figura 5.49. Variação de B (lei da parede) com respeito a concentração volumétrica C_v para os três tipos de solo Bv, Tr e V.

Os valores de B apresentam o mesmo comportamento observado do gráfico k com C_v , figura 5.49, porém de uma forma mais acentuada. Para o solo Bv, os valores de B decrescem com C_v . No solo Tr, os primeiros valores B (pontos $C_v=1,23\%$; $1,33\%$; $2,82\%$ e $2,89\%$) são menores aos valores observados para água limpa, com o incremento da concentração, o valor de B aumenta até equiparar-se ao valor de k em água limpa. No solo V, o primeiro valor B é similar ao da água limpa, com o incremento de C_v o valor de B chega a ser maior que o da

água limpa.

Nas análises do comportamento do termo B com a concentração, levando em consideração as características do sedimento, observa-se um comportamento similar ao observado nas análises obtidas para o coeficiente de Von Karman. Isto é, a formação de dois grupos, um com o solo arenoso Bv e outro com os solos argilosos Tr e V, segundo características do sedimento. Em uma análise mineralógica, observa-se que o solo V (esmectítico) apresenta valores superiores aos observados no solo Tr (caulinítico). Na realidade, o fator B reflete o ponto de intercepção da curva de ajuste (expresso em termos de u/u^* e yu^*/ν) sobre o eixo u/u^* . Então, mudanças na declividade do perfil de velocidade (coeficiente k) refletirá em mudanças no ponto de intercepção (termo B).

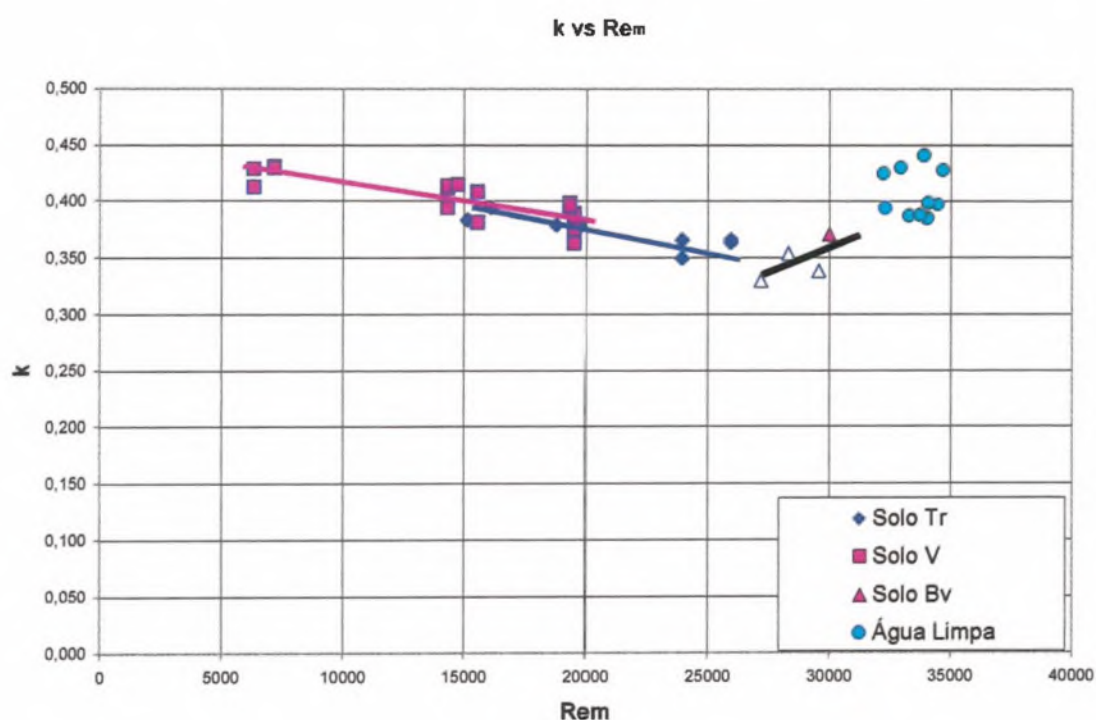


Figura 5.50. Variação de k (lei da parede) com respeito a Reynolds para os três tipos de solo Bv, Tr e V.

Quando se analisa a variação de k com o Reynolds Re_m , figura 5.50, observa-se que, no caso do solo Bv, o valor de k aumenta quando o Reynolds aumenta. Os valores de k e de Reynolds, no entanto, são menores aos observados em água limpa. Este comportamento foi similar ao encontrado por Wang e Plate (1994). Para o caso dos solos Tr e V existe um decréscimo do valor de k com o aumento de Reynolds.

O coeficiente k, na análise de características dos sedimento, apresenta dois tipos de comportamento: um aumento de k com o Reynolds, para o solo Bv, com características

arenosa; e outro comportamento contrário ao primeiro, uma diminuição do valor de k com o aumento do Reynolds, para os solos Tr e Bv, com características argilosas. Para a análise de k referente à mineralogia, pode-se observar que os valores obtidos de k para solo V são ligeiramente maiores que os de Tr.

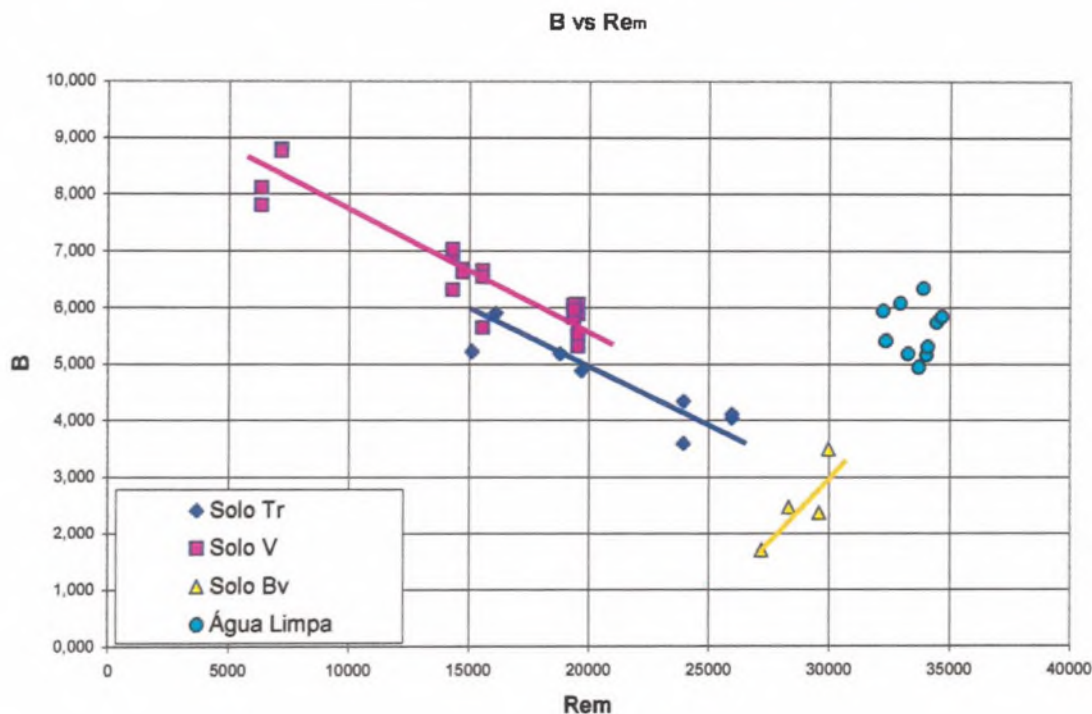


Figura 5.51. Variação de B (lei da parede) em relação a Reynolds para os três tipos de solo Bv, Tr e V.

Analisando os resultados apresentados, pode-se perceber que as figuras correspondentes à análise do Reynolds com as constantes k e B (figuras 5.50 e 5.51) mantêm os mesmos padrões de comportamento observados nas figuras 5.48 e 5.49 mas em um sentido inverso. Essa característica se deve ao fato de que a maioria dos testes foram realizados em condições de vazões quase similares e declividades constantes (5% e 8,7%). Apenas o valor da concentração do sedimento em suspensão foi variável. Isto faz com que os valores dos parâmetros hidráulicos (h e u) de cada teste permaneçam próximos e sofram poucas mudanças com o aumento da concentração. Sendo a viscosidade cinemática uma variável que sofre ação considerável da concentração; com o aumento da concentração aumenta-se a viscosidade cinemática. Sendo $Re_m = uh/v$, qualquer incremento de C_v gera uma diminuição do Re_m e, como os valores de u e h não sofreram mudanças significativas, pode-se afirmar, a grosso modo, que os gráficos 5.50 e 5.51 representam uma expressão inversa dos gráficos 5.48 e 5.49, respectivamente.

Para a análise dos resultados obtidos pela equação dos déficits da velocidade, o procedimento será o mesmo que o empregado nos resultados da equação da lei da parede. A figura 5.52 apresenta os resultados da variação do k' com relação à concentração para os diferentes tipos de solo Bv, Tr e V.

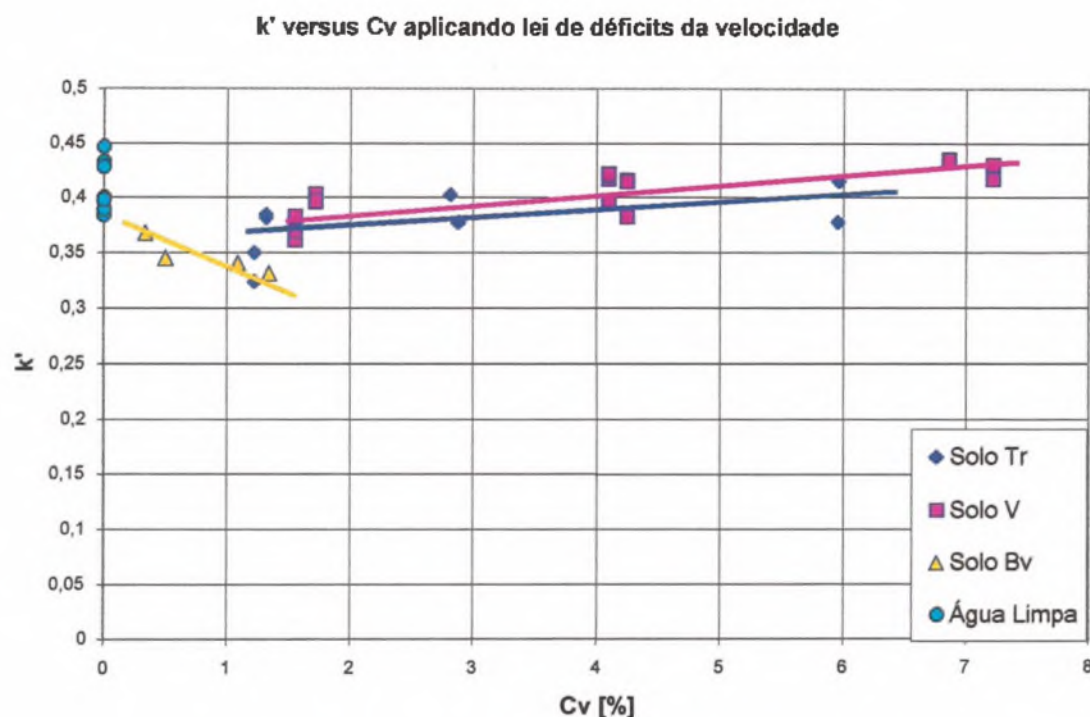


Figura 5.52. Variação de k' (lei do déficits da velocidade) em relação à concentração volumétrica para os três tipos de solo Bv, Tr e V.

O comportamento de k' é similar ao observado na figura 5.48 que ilustra os resultados obtidos pela equação da lei da parede. O valor de k para o solo Bv diminui com o incremento da concentração. No caso de Tr e V os valores de k apresentam um comportamento contrário ao primeiro, existe um aumento de k com respeito ao incremento de C_v . Em todos os casos os valores de k para as concentrações baixas são valores menores aos obtidos em água limpa.

Observa-se que o comportamento de k' (equação dos déficits da velocidade) com o aumento da concentração é similar ao observado no comportamento de k (lei da parede) nas análises das características do sedimento e da mineralogia. Na análise da característica do sedimento, observa-se também a formação de dois grupos: o primeiro composto pelo solo Bv (apresentando um aumento da declividade do perfil de velocidade, expresso em termos de u/u^* e $y u^*/v$, com o aumento da concentração) e o segundo conformado pelos solo Tr e V (apresentando uma diminuição da declividade do perfil de velocidade, expresso em termos de u/u^* e $y u^*/v$, com o aumento da concentração). Do ponto de vista mineralógico, observa-se o

maior efeito da concentração sobre os valores de k' para o solo V (esmectítico) que o observado para o solo Tr (caulinítico).

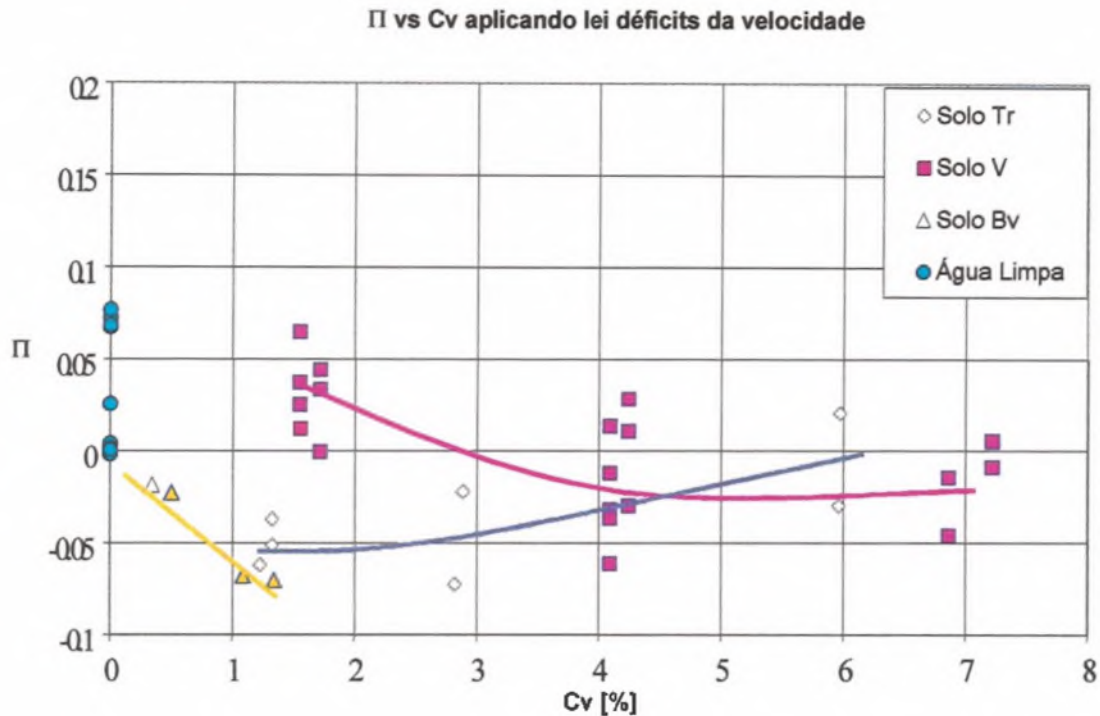


Figura 5.53. Variação de Π (lei do déficits da velocidade) em relação à concentração volumétrica para os três tipos de solo Bv, Tr e V.

Na análise da variação de Π com C_v (figura 5.53), no solo Bv, os valores de Π são negativos e diminuem com o incremento de C_v . Para o solo Tr se observa um leve incremento de Π com o incremento de C_v , os primeiros valores são negativos. O solo V apresentou uma relação não muito definida, no início se observa um decréscimo de Π e, após uma estabilização, valores próximos de zero na zona negativa. Estes valores negativos também foram observados por Wang e Plate (1994). Os valores de Π perto de zero para o caso de Tr e V demonstram, na realidade, que a equação de defeito da velocidade aproxima-se da equação da lei da parede.

Como foi mencionado na análise do coeficiente de Von Karman, a relação entre este coeficiente e a concentração volumétrica apresentou o mesmo padrão de comportamento em relação ao número de Reynolds, mas em sentido inverso. Isto pode ser observado comparando os gráficos das figuras 5.52 e 5.54. Para o caso de Π e Reynolds, figura 5.55, não foi observado uma relação determinada.

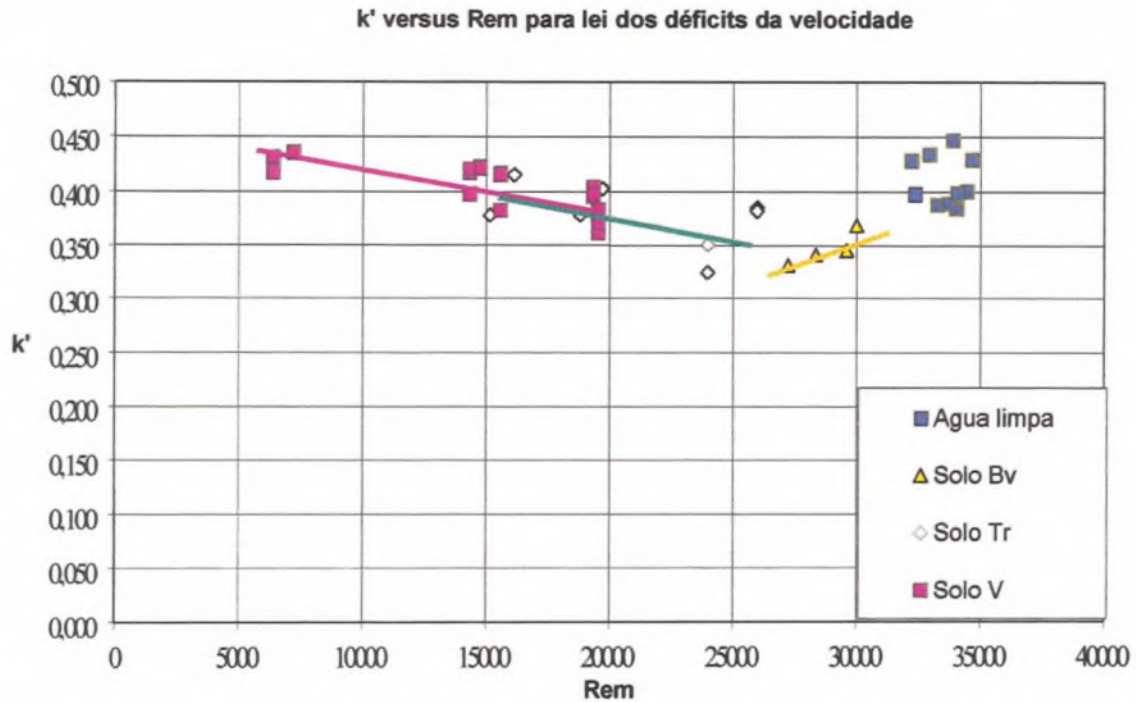


Figura 5.54. Variação de k (lei dos déficits da velocidade) em relação a Reynolds para os três tipos de solo Bv, Tr e V.

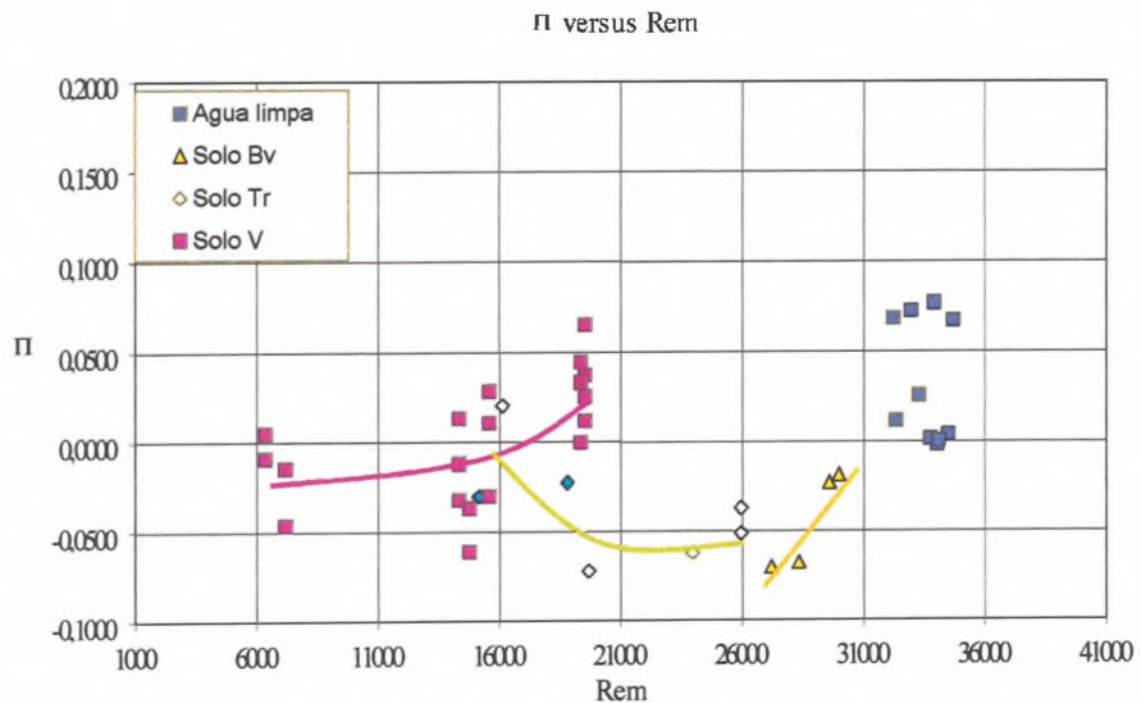


Figura 5.55. Variação de Π (lei dos déficits da velocidade) em relação a Reynolds para os três tipos de solo Bv, Tr e V.

5.5.6. Resultados do perfil de concentração para um fluido com água limpa e sedimento em suspensão.

A seguir serão discutidos os resultados do sistema de coleta de sedimentos. Deve-se mencionar que devido a limitações técnicas não foi possível levantar um perfil de concentração mais detalhado. O conjunto de testes programados foi realizado para duas declividades 5% e 8,7%, empregando um tubo coletor de amostra de 1,5 mm de diâmetro interno e as alturas de escoamento na faixa de 6,5 mm a 8,5mm. Estas baixas alturas de escoamento e o diâmetro interno do tubo de coleta possibilitaram definir apenas dois ou três pontos de amostragem dentro do escoamento. Apesar dessas limitações, os resultados foram aceitáveis.

- Solo Bv

Na tabela 5.34 são apresentados os resultados do perfil de concentração para o solo Bv para as declividades 5% e 8,7%. A primeira coluna representa a codificação das amostras, as letras F, M e S que acompanham aos números dos testes, representam uma profundidade referencial onde foram coletados os sedimentos. Por exemplo, a amostra B1F, refere-se à coleta realizada no teste B1 e a amostragem no fundo do canal (F). Os termos M e S querem dizer no meio e na superfície do canal, respectivamente. A segunda coluna mostra a profundidade onde foi feita a coleta.

Tabela 5.34. Resultados do coletor de sedimentos para solo Bv

Amostra Código	Profundidade [y/h]	Material Grosso [%]	Material Fino [%]	Cv Total %
Bv1 F	0,15	46,8	53,2	0,40
Bv1 M	0,50	39,8	60,2	0,34
Bv1 S	0,85	20,4	79,6	0,42
Bv1		34,5	65,5	0,34
Bv2 F	0,14	7,2	92,8	1,45
Bv2 M	0,42	17,5	82,5	1,07
Bv2 S	0,70	13,2	86,8	1,09
Bv2		33,8	66,2	1,09
Bv3 F	0,18	24,1	75,9	0,56
Bv3 S	0,62	20,9	79,1	0,52
Bv3		25,0	75,0	0,51
Bv4 F	0,18	53,2	46,8	1,17
Bv4 S	0,60	42,9	57,1	1,22
Bv4		23,3	76,7	1,35

Para cada amostra foi determinada a porcentagem de material grosso e fino dentro do sedimento em suspensão. As amostras que não estejam acompanhadas pelas letras F, M e S representam os valores da concentração total do escoamento e coincidem com o número de testes realizados.

O sistema de coleta ofereceu bons resultados. Em geral, observa-se que o perfil de concentrações é quase homogêneo. Existem algumas discrepâncias quando se faz a análise da porcentagem de material grosso e fino. Comparações entre as porcentagens de material fino e grosso do resultado total e das porcentagens obtidas em cada profundidade não guardam relação alguma. Esses resultados contraditórios se devem a problemas de entupimento do tubo no momento do enchimento.

- Solo Tr

A tabela 5.35 mostra os resultados para o solo Tr. Observa-se que as amostras possuem uma quantidade considerável de material fino, oscilando em média de 90%.

Tabela 5.35. Resultados do coletor de sedimentos para solo Tr

Amostra Código	Profundidade [y/h]	Material Grosso [%]	Material Fino [%]	Cv Total %
Tr1 F	0,16	7,4	92,6	1,33
Tr1 M	0,48	4,7	95,3	1,30
Tr1 S	0,81	1,7	98,3	1,31
Tr1		2,2	97,8	1,23
Tr3 F	0,17	12,6	87,4	2,64
Tr3 M	0,50	8,0	92,0	2,59
Tr3 S	0,83	5,9	94,1	2,76
Tr3		3,8	96,2	2,89
Tr4 F	0,15	5,7	94,3	5,97
Tr4 M	0,51	3,7	96,3	5,70
Tr4 S	0,81	1,8	98,2	5,50
Tr4		5,0	95,0	5,96
Tr5 F	0,19	16,6	83,4	1,12
Tr5 S	0,64	4,4	95,6	1,19
Tr5		3,5	96,5	1,33
Tr7 F	0,20	2,7	97,3	6,56
Tr7 S	0,67	5,6	94,4	2,35
Tr7		2,0	98,0	2,82
Tr8 F	0,19	9,9	90,1	5,64
Tr8 S	0,63	7,2	92,8	5,41
Tr8		3,5	96,5	5,97

As porcentagens de material grosso coletadas nos pontos perto do fundo do canal para cada teste são, em geral, maiores que as porcentagens de material grosso presentes na concentração total do escoamento. Isto é devido à acumulação de sedimento na entrada da sonda no instante da coleta, devido à proximidade da mesma ao fundo do canal.

Existem alguns valores de concentração pontual dentro do escoamento que são maiores às concentrações do escoamento total. Isto sugere problemas de enchimento do tubo coletor.

- *Solo V*

A tabela 5.36 apresenta os resultados do perfil de concentrações do solo V, de maneira similar aos resultados do solo Tr. Constata-se uma maior porcentagem de material fino do que material grosso, sendo em média de 95% de material fino presente no escoamento. As concentrações de material grosso nos pontos de coleta perto do fundo do canal são em geral maiores que a concentração total de material grosso do escoamento, como foi explicado anteriormente. Durante o processamento dos resultados experimentais da concentração aconteceu a perda do material dos testes V1 e V10. Por este motivo que não encontram-se resultados de porcentagens de material fino e grosso dentro das amostras.

Tabela 5.36. Resultados do coletor de sedimentos para solo V

Amostra Código	Profundidade [y/h]	Material Grosso [%]	Material Fino [%]	Cv Total %
V1 F	0,17			1,53
V1 M	0,45			1,60
V1 S	0,73			1,53
V1				1,56
V5 F	0,15	4,3	95,7	4,20
V5 M	0,45	3,4	96,6	4,21
V5 S	0,76	3,1	96,9	4,02
V5		1,8	98,2	4,25
V8 F	0,17	11,2	88,8	7,56
V8 M	0,52	7,4	92,6	7,07
V8 S	0,87	5,5	94,5	6,91
V8		7,3	92,7	7,22
V10 F	0,21			1,77
V10 S	0,70			1,68
V10				1,72
V13 F	0,19	2,3	97,7	3,93
V13 S	0,65	2,1	97,9	3,80
V13		5,2	94,8	4,1
V18 F	0,20	9,0	91,0	7,13
V18 S	0,69	7,7	92,3	7,04
V18		5,9	94,1	6,86

Como foi mencionado anteriormente, as limitações de ordem técnica originadas pela pouca espessura da lâmina do escoamento impediram definir um perfil de concentração mais detalhado. Isto impediu a determinação dos números de Richardson e a realização de uma análise mais detalhada do efeito da concentração no perfil de velocidades.

6. Resumo dos Resultados, Conclusões e Recomendações

6.1. Resumo dos Resultados e Conclusões

O desenvolvimento de uma metodologia para o estudo do efeito da concentração de sedimentos em suspensão sobre as características dinâmicas do escoamento foi motivo deste estudo. As principais conclusões são:

1. A caracterização do sedimento para cada tipo de solo foi bem sucedida, permitindo determinar a massa específica e textura do sedimento. Identificaram-se dois tipos de sedimento: um arenoso (solo Bv) e outro argiloso (solos Tr e V). Obtendo-se, que a massa específica do solo V, nas classes areia média, areia fina, areia muito fina e silte/argila, foram menores que dos solos Tr e Bv.
2. Com respeito às propriedades reológicas dos solos, conclui-se o seguinte: o solo Brunizém Vertico (Bv) apresentou decantação de sedimento no fundo do cilindro externo do viscosímetro devido a sua natureza siltosa. Isto originou um atrito que se reflete na forma de uma pseudo tensão de escoamento. Em concentrações maiores que 2%, este atrito é mais evidente e gera leitura fora da faixa de funcionamento do torque do viscosímetro. Para os solos Terra Roxa (Tr) e Vertissolo (V), foi possível determinar os seus reogramas correspondentes. A análise da variação da viscosidade com a concentração mostrou que o solo V apresentou maior suscetibilidade ao aumento da concentração que o solo Tr. Uma explicação para este comportamento é a composição esmectítica do primeiro que origina maior resistência molecular ao escoamento. A seguir são mostradas os resumos das propriedades reológicas dos solos Bv, Tr e V.

Tabela 6.1. Resumo dos resultados das amostras do solo Bv

Cv [%]	τ_b [dina/cm ²]	τ_w [dina/cm ²]	η [dina.s/cm ²]	η [N.s/m ²]	ν [m ² /s]	T °C	R ²
1,261	0,248	0,2262	0,0172	0,00172	1,726E-06	27,3	0,9297

Tabela 6.2.a. Resumo das amostras do solo Tr (Cv=5,96 %)

Cv [%]	τ_b [dina/cm ²]	τ_w [dina/cm ²]	η [dina.s/cm ²]	η [N.s/m ²]	ν [m ² /s]	T °C	R ²
5,96	0,2590	0,2362	0,0208	0,00208	1,899E-06	26,8	0,9768

Tabela 6.2.b. Resumo das amostras do solo Tr ($C_v=2,74\%$ e $C_v=0,94\%$)

C_v [%]	μ [dina.s/cm ²]	μ [N.s/m ²]	ν [m ² /s]	T °C	R ²
2,74	0,0139	0,00139	1,395E-06	26,3	0,9256
0,94	0,0112	0,00112	1,124E-06	26,2	0,9218

Tabela 6.3.a. Resumo do solo V ($C_v=7,07\%$)

C_v [%]	τ_b [dina/cm ²]	τ_w [dina/cm ²]	μ [dina.s/cm ²]	μ [N.s/m ²]	ν [m ² /s]	T °C	R ²
7,07	1,2497	1,1396	0,0402	0,00402	4,033E-06	26,3	0,9541

Tabela 6.3.b. Resumo do solo V ($C_v=3,72\%$ e $C_v=1,42\%$)

C_v [%]	μ [dina.s/cm ²]	μ [N.s/m ²]	ν [m ² /s]	T °C	R ²
3,72	0,0190	0,00190	1,906E-06	26,5	0,9652
1,42	0,0126	0,00126	1,242E-06	26,1	0,9348

- O cálculo da velocidade de queda em água limpa no tubo de Griffith apresentou uma performance qualitativa razoável, observando-se uma diminuição da velocidade de queda com a diminuição do diâmetro médio das classes analisadas. Com respeito ao funcionamento quantitativo, foi observada uma alta taxa de diferença, “erro relativo”, entre o valor de velocidade de queda calculado neste trabalho e as velocidades teóricas (Concharov, Van Rijn e Cheng). Atribui-se este fato a problemas de ordem técnica, tais como a aceleração da amostra no ingresso ao tubo e a umidade do meio ambiente.
- Nas curvas de análise do efeito da concentração do material fino em suspensão sobre a velocidade de queda de material grosso foi observado, para os três solos (Bv, Tr e V), que a curva (velocidade de queda adimensional versus a concentração volumétrica) para areia muito fina (AMF) se sobrepõe às curvas de areia média (AM) e areia fina (AF). Observa-se também que existe uma aproximação da curva AF à curva AM conforme aumenta a concentração. Conclui-se que este comportamento é devido à estratificação da massa

específica presente no tubo de decantação e no sistema de coleta, gerando um incremento na velocidade esperada. Sugere-se restringir o emprego do tubo de Griffith para a análise da velocidade de queda para sedimento da ordem de areia média.

Tabela 6.4. Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do solo Bv.

Cv [%]	Classe	Velocidade Queda [cm/s]	Temperatura [°C]	w_m/w
0	AM	5,59	22	1,00
1,20	AM	5,48	24	0,98
2,49	AM	4,31	24	0,77
3,54	AM	3,39	24	0,61
0	AF	2,81	21	1,00
1,20	AF	2,68	22	0,95
2,49	AF	1,87	24	0,66
3,54	AF	1,45	24	0,52
0	AMF	0,93	22	1,00
1,2	AMF	0,87	23	0,93
2,49	AMF	0,74	23	0,79
3,54	AMF	0,61	24	0,66

Tabela 6.5. Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do solo Tr

Cv [%]	Classe	Velocidade Queda [cm/s]	Temperatura [°C]	w_m/w
0	AM	4,70	22	1,00
1,7	AM	4,72	24	1,00
3,7	AM	2,58	25	0,55
7,2	AM	1,93	24	0,41
0	AF	2,83	22	1,00
1,7	AF	2,06	24	0,73
3,7	AF	1,17	25	0,41
7,2	AF	0,97	25	0,34
0	AMF	1,09	22	1,00
1,7	AMF	0,78	25	0,71
3,7	AMF	0,62	25	0,56
7,2	AMF	0,54	25	0,50

Tabela 6.6. Resumo dos testes realizados com as amostras de material grosso do solo V.

Cv	Classe	Velocidade Queda	Temperatura	w_m/w
0	AM	4,36	23	1,00
1,01	AM	3,54	19	0,81
3,02	AM	2,77	18	0,64
7,11	AM	1,51	26	0,35
0	AF	2,17	23	1,00
1,01	AF	1,51	18	0,70
3,02	AF	1,14	18	0,53
0	AMF	0,89	24	1,00
1,01	AMF	0,52	18	0,58
3,02	AMF	0,41	18	0,45
7,11	AMF	0,40	20	0,44

5. O sistema de medição de velocidade permite determinar o perfil de velocidades de um escoamento. Para água limpa foram realizadas análises do perfil de velocidades aplicando as equações da “lei da parede” e do “déficits da velocidade”. Os resultados mostraram que os coeficientes de Von Karman k e B (calculados pela lei da parede) foram muito próximos dos valores obtidos por Nikuradse e Kirkgöz (1989). O valor de k (obtido pela equação de déficits da velocidade) mostrou ser muito próximo ao obtido pela lei da parede. Os valores de Π foram muito próximos a zero o que demonstra que a primeira equação descreve melhor o perfil de velocidade. Isto também foi observado por Nezu e Rodi (1986) para as mesmas faixas de Reynolds do escoamento. Deve-se mencionar que do ponto de vista físico, o coeficiente de Von Karman (k ou k') representa a mudança da declividade do perfil de velocidade (expressos de forma adimensionalizada em termos de u/u^* e yu^*/ν), sendo que o termo B representa o ponto de intercepção da equação da “lei da parede” e dependerá da mudança da declividade do perfil de velocidade (mudança de k). No caso do termo Π , deve-se mencionar que sua função é meramente compensadora dentro da equação dos “déficits da velocidade”. Por tal motivo, as conclusões da análise do efeito de sedimentos em suspensão sobre o perfil de velocidade, será unicamente sob os termos do coeficiente de Von Karman.
6. O sistema de medição de velocidade permitiu avaliar o efeito do sedimento no perfil de velocidades. O aumento da concentração para escoamentos com material em suspensão

(solo Bv) ocasionou uma diminuição do valor de k , resultado similar ao observado por Coleman (1986) e Wang e Plate (1994). Para escoamentos com sedimento em suspensão, (solos Tr e V) o fenômeno foi o contrário ao observado no solo Bv. Observou-se um aumento do valor de k com o incremento da concentração. Em todos os casos, os valores de k calculados pela equação da lei da parede foram muito próximos aos calculados pela equação dos déficits da velocidade. Na tabela 6.7 é apresentado um resumo de todos os testes realizados e os resultados obtidos.

Tabela 6.7. Resumo dos resultados do perfil de velocidades para água limpa e os solos Bv, Tr e V.

Tipo de Solo	S [%]	Cv [%]	k lei da parede	B	k Déficits de velocidades	Π
Água Limpa	5,0	0,00	0,391	5,280	0,393	0,0066
Água Limpa	8,7	0,00	0,431	6,047	0,409	0,0325
Bv	5,0	0,34	0,371	3,498	0,368	-0,0188
Bv	5,0	1,09	0,354	2,473	0,341	-0,0678
Bv	8,7	0,51	0,338	2,369	0,345	-0,0229
Bv	8,7	1,35	0,330	1,706	0,331	-0,0703
Tr	5,0	1,23	0,358	3,974	0,337	-0,0867
Tr	5,0	2,89	0,379	5,187	0,378	-0,0225
Tr	5,0	5,96	0,383	5,224	0,378	-0,0301
Tr	8,7	1,33	0,365	4,079	0,383	-0,0442
Tr	8,7	2,82	0,379	4,880	0,402	-0,0724
Tr	8,7	5,97	0,394	5,901	0,415	0,0204
V	5,0	1,56	0,378	5,695	0,373	0,0347
V	5,0	4,25	0,399	6,278	0,405	0,0029
V	5,0	7,22	0,421	7,957	0,424	-0,0020
V	8,7	1,72	0,396	5,944	0,399	0,0256
V	8,7	4,10	0,410	6,717	0,416	-0,0258
V	8,7	6,86	0,430	8,777	0,435	-0,0304

Em uma análise que considera as características do sedimento, pode-se concluir que existem dois tipos de comportamento do coeficiente de Von Karman sob o efeito da concentração. No primeiro tipo de comportamento, para solo arenoso (Bv), observa-se uma diminuição do valor do coeficiente k com o aumento da concentração, isto é, um aumento da declividade do perfil de velocidade (expresso em termos de u/u^* e yu^*/v). Já no segundo tipo de comportamento, para solos argilosos (Tr e V), observa-se que o coeficiente k aumenta com o aumento da concentração, isto é, uma diminuição da declividade do perfil de velocidade (expresso em termos de u/u^* e yu^*/v) com o aumento da concentração. Uma possível explicação para este comportamento é devido ao fato de que os solos arenosos apresentam uma tendência de formar um perfil de concentração com um gradiente de concentração acentuado, sendo que a maior concentração de

material grosso é localizado na parte inferior do escoamento (região perto da parede), produzindo uma diminuição da quantidade de movimento nesta região. Pelos princípios de conservação de quantidade de movimento e massa, é constatado que existe um efeito compensatório do escoamento, aumentando-se a quantidade de movimento na região superior ao mesmo.

Para solos argilosos, Tr e V, talvez o comportamento observado no escoamento esteja ligado ao fato de que o material fino em suspensão apresenta uma tendência a formar um perfil de concentração com baixos gradientes de concentração, com uma distribuição homogênea do sedimento no escoamento.

Em outro tipo de análise, sob o ponto de vista da mineralogia, pode-se concluir que o solo esmectítico (V) apresenta valores de k com maior suscetibilidade ao aumento da concentração, em comparação aos resultados observados de valores de k para solo caulínico (Tr). É interessante comprovar que este resultado é análogo aos resultados obtidos na análise dos parâmetros reológicos, permitindo inferir que a composição mineralógica do material em suspensão afetará o padrão de escoamento.

Também é de ressaltar, que o solo esmectítico (V), apresentou uma massa específica - em média dentro das classes areia média, areia fina, areia muito fina e material fino silte/argila - menor que o observado no solo caulínico (Tr). Menores massas específicas dos sedimentos em suspensão determinaram uma maior capacidade de transporte em suspensão, e uma distribuição da concentração de forma mais homogênea.

Conclui-se, finalmente, que existe evidência para afirmar que a característica do sedimento (textura e massa específica) e a composição mineralógica afeta o perfil de velocidade.

7. O amostrador de sedimento mostrou bons resultados quantitativos de medição do perfil de concentração. Na análise comparativa entre a concentração de alguns pontos dentro da altura total do escoamento com a concentração total do escoamento, foi verificada pouca diferença entre os resultados. Não foi possível realizar uma análise mais detalhada do perfil de concentração devido às limitações técnicas existentes no estudo de escoamentos de pouca espessura. Estas limitações técnicas impediram reforçar as análises do perfil de velocidade para avaliação do efeito da característica e da composição mineralógica do material em suspensão sobre a capacidade de transporte em suspensão, assim como estabelecer relações entre os resultados dos efeitos da concentração de material fino em suspensão sobre a velocidade de queda de material grosso obtidos no tubo de Griffith.

6.2. Recomendações

As principais recomendações são:

1. Deve-se obter reogramas com outros tipos de viscosímetros, de preferência do tipo cônico, a fim de comparar os resultados com os obtidos com o viscosímetro de cilindros concêntricos. Deve-se determinar reogramas para amostras contendo agentes defloculantes e comparar as mudanças obtidas com os reogramas de amostras sem este agente. Estes resultados serviram como base na análise do efeito da concentração de material fino na velocidade de queda de material grosso;
2. Deve-se realizar testes de cálculo de velocidade de queda no tubo de Griffith introduzindo algumas modificações no copo do sistema de entrada da amostra e adequar um ambiente acondicionado de temperatura e umidade controladas;
3. A potência da bomba do canal deve ser aumentada a fim de se obter uma altura de escoamento maior, de preferência acima de 2 cm. Assim, será possível avaliar os perfis de velocidade e concentração;
4. É recomendada a realização de uma correlação entre velocidade de queda experimental e as classes presentes no perfil de concentrações do escoamento.
5. Surge a necessidade de novas pesquisas envolvendo outros tipos de solos, a fim de complementar a pesquisa feita por Albuquerque (1998) e estabelecer uma relação entre padrões de escoamento e o tipo de solo empregado.

7.- Bibliografia

- Abrahams, A. D. e Li G. 1998. Effect of salinization on flow resistance and bed roughness in overland flow. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 23. p. 953-960.
- Albuquerque, J. A. 1998. **Suscetibilidade de alguns solos do Rio Grande do Sul a erosão em entressulcos**. Tese de Doutorado, Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 154 p.
- Barnes, H. A.; Hutton, J. F. e Walters K. 1989. **An Introduction to Rheology**. Holanda, Elsevier Science Publishers. 130 p.
- Barton, J. R. e Lin, P. N. 1955. A study of sediment transport in alluvial channels. In Garde, R. J. e Ranga Raju, K. G. 1978. **Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems**. New Delhi, Wiley Eastern Limited, 483 p.
- Brookfield. 1998. Manual No. M/97-164. **Manual de instruções de operação: viscosímetro digital programável, Modelo DV-II+**. Braseq. 71 p.
- Carvalho, A. P.; Abrão, P. U. R.; Fasolo, P. J. e Potter, R. O. 1988. **Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do arroio Taboão (Pejuçara/Ijuí – RS)**. Relatório Técnico (sem especificações de origem), 38p.
- Carvalho, N. O. 1994. **Hidrossedimentologia**. Rio de Janeiro, CPRM, 372p.
- Cheng, N.S. 1997.a. Simplified settling velocity formula for sediment particle. **J. Hydraulic Engineering**, February, 123 (2): 149-152.
- _____. 1997.b. Effect of concentration on settling velocity of sediment particle. **J. Hydraulic Engineering**, August. 123(8): 728-731.
- Chien, N. e Wan, Z. 1983. Mechanics of sediment movement (em Chinês). In: Song, T. e Chiew Yee-Meng. 1997. Settling characteristics of sediments in moving Bingham fluid. **Journal of Hydraulic Engineering**, September, 123 (9): 812-815.

- Coleman, N. L. 1981. Velocity profiles with suspended sediment. **J. Hydraulic Research**, Delft, IAHR, 19 (3):221-227.
- _____. 1986. Effects of suspended on the open-channel velocity distribution. **Water Resources Research**, September, 22 (10):1377-1384.
- Coles, D. 1956. The law of the wake in the turbulence boundary layer. **J. of Fluid Mechanics**, 1 v., p. 191-226.
- Concharov. 1962. In: Cheng, N.S. 1997.a. Simplified settling velocity formula for sediment particle. **J. Hydraulic Engineering**, February, 123 (2): 149-152.
- Einstein, H. A. e Chien, N. 1955. **Effects of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution**. MRD Series, Institute of Engineering Research, University of California, Berkeley, serie n.8, 96 p.
- Elata, C. e Ippen, A. T. 1961. The dynamics of open channel flow with suspensions of neutrally buoyant particles. **Dept. of Civil and Sanitary Engr. Techn., M.I.T.**, relatório n. 45, 69 p.
- Garde, R. J. e Ranga Raju, K. G. 1978. **Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems**. New Delhi, Wiley Eastern Limited. 483 p.
- Graf, W. H. 1971. **Hydraulics of sediment transport**. New York, MacGraw-Hill Book Co. Inc., 513p.
- Gust, G. 1976. Observations on turbulent drag reduction in a dilute suspension of clay in seawater. In: Coleman, N. L. 1981. Velocity profiles with suspended sediment. **J. Hydraulics research**, Delft, IAHR, 19 (3): 221-227.
- Harsine, P. e McTainsh, G. 1986. The Griffith Tube: A simple settling tube for the measurement of settling velocity of aggregates. **AES Working Paper 3/86**, Griffith University, Australia, Junho, 19 p.
- Huffman, G. D. e Bradshaw, P. 1972. A note on Von Karman's constant in low Reynolds

number turbulent flows. **J. Fluid Mechanic.**, 53 (1): 45-60.

Ismail, H.M. 1952. Turbulent transfer mechanics and suspended sediment in closed channel. :
In Garde, R. J. e Ranga Raju, K. G. 1978. **Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems**. New Delhi, Wiley Eastern Limited. 483 p.

Kalinske, A. A. e Hsia, C. H. 1945. Study of transportation of fine sediments by flowing water.
In: Coleman, N. L. 1981. Velocity profiles with suspended sediment. **J. Hydraulic Research**, Delft, IAHR, 19 (3): 221-227.

Karen, R. 1989. Rheology of mixed kaolinite-montmorillonite suspensions; **Soil Sci. Am. J.**, n. 53, p: 725-730.

Kereselidze, N. B. e Kutavaia, V. I. 1995. Experimental research on kinematics of flows with high suspended solid concentration. **J. Hydrailic Research**, 33 (1): 65-75.

Kirkgoz, M. S. 1989. Turbulent velocity profiles for smooth and rough open channel flow. **J. Hydraulic Engineering**, ASCE, Novembro, 15 (11): 1543-1561.

Kløbanoff, P. S. 1954. Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient. In: Kirkgoz M. S. 1989. Turbulent velocity profiles for smooth and rough open channel flow; **J. Hydraulic Engineering**, ASCE, Novembro, 15(11): 1543-1561.

Laursen, E. M. 1958. Total sediment load of streams. In: Garde, R. J. e Ranga Raju, K. G. 1978. **Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems**. New Delhi, Wiley Eastern Limited. 483 p.

Major J. J. e Pierson T. C. 1992. Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries; **Water Resources Research**, AGU, March, 28 (3): 841-857.

Merten G. 2000. **Dinâmica da erosão em sulcos alterado pelo incremento da descarga sólida**. Tese de doutorado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre. 116 p.

- Monin, A. S. e Yaglom, A. M. 1971. Statistical fluid mechanics (tradução em Inglês de: Statisicheskaya gidromekhanika-Mekhanika Turbulentnosti). **Techn. Press, M.I.T., Cambridge**, 769 p.
- Muste, M. e Patel, V. C. 1997. Velocity profiles for particles and liquid in open-channel flow with suspended sediment. **J. Hydraulic Engineering**, ASCE, Setembro, 123 (9): 742-751.
- Nezu, I. e Rodi, W. 1986. Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer, **J. Hydraulic Engineering**. ASCE, May, 112 v., n. 5.
- Nikuradse, J. 1933. Laws of flow in rough pipes. (Tradução em Inglês de: Stroemungsgesetze in rauhen Rohren). **Nat. Advisor Council of Aeronautics Techn.**, Mem. 1292, ano 1950, 61 pp.
- O'Brien, J. S. e Julien, P. Y. 1988. Laboratory analysis of mudflow properties; **J. Hydraulic Engineering**, ASCE, August, 114 (8): 877-887.
- Quian, N. e Wan, Z. 1983. Mechanics of sediment movement (em Chinês). In: Wan, Z. e Wang, Z. 1994. **Hyperconcentrated flow**. The Netherlands, IAHR monograph series, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam. 290p.
- Raudkivi, A. J. 1967. **Loose boundary hydraulics**. New York, Pergamon Press Inc., 331 pp.
- Rubey, W. 1933. Settling velocities of gravel, sand and silt particles. *Am. J. Sc.*, 5th serie, 25 (148):332-352
- Shlichting, H. 1968. **Boundary layer theory**. New York, MacGraw-Hill. 647p.
- Song, T. e Chiew Yee-Meng. 1997. Settling characteristics of sediments in moving Bingham fluid. **J. Hydraulic Engineering**, ASCE, Setembro, 123 (9): 812-815. .,
- Steffler, P. M.; Rajaratnam, N. e Petersen, A. W. 1985. LDA measurements in open channel. **J. Hydraulic Engineering**. ASCE, 111 (1): 119-130.

- Townsend, A. A. 1956. The structure of turbulent shear flow. In: Kirkgoz M. S. 1989. Turbulent velocity profiles for smooth and rough open channel flow; **J. Hydraulic Engineering**, ASCE, November, *15 (11)*: 1543-1561.
- Valentik, L. e Whitmore, R. L. 1965. The terminal velocity of spheres in Bingham plastics. **J. Appl. Phys.**, 116 v., p. 1197-1203.
- Van Driest, E. R. 1956. On the turbulence of flow near a wall. **J. Aeronautical Science**, 23 v., p. 1007-1011.
- Van Rijn, L.C. 1989. Hand Book: sediment transport by currents and waves. In: Cheng, N.S. 1997.a. Simplified settling velocity formula for sediment particle. **J. Hydraulic Engineering**, ASCE, February, *123 (2)*: 149-152.
- Vanoni, V. A. 1946. Transportation of suspended sediment by water, **Trans. ASCE**, 3 (2267): 67-133.
- Wan, Z. e Wang, Z. 1994. **Hyperconcentrated flow**. The Netherlands, IAHR monograph series, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, 290p.
- Wang, Y. Z. e Ren, Y. M. 1995. Total pressure probe for the measurement of turbulence in sediment-landed flows; **Advances in Hydro-Science and Engineering**, March 22-27, Beijing, China. II v., p. 1875-1882.
- Wang, Z. e Plate, E. J. 1996. A preliminary study on the turbulence structure of flows of non-Newtonian fluid. **Journal of Hydraulic Research**. IAHR, *34(3)*: 577-600.
- Wang, Z.; Larsen, P. e Xiang, W. 1994. Rheological properties of sediment suspensions and their implications. **Journal of Hydraulic Research**, IAHR, *32 (4)*: 495-516.
- Yalin, M. S. 1972. **Mechanics of sediment transport**. New York, Pergamon Press Inc., 290p.

Yang, W. e Zhao, W. 1983. An experimental study of the resistance to flow with hyperconcentration in rough flumes. In: Wan, Z. e Wang, Z. 1994. **Hyperconcentrated flow** . The Netherlands, IAHR monograph series, A. A. Balkema, Rotterdam, 290p.

ANEXO A

Análise do Solo e Propriedades dos Sedimentos

ANEXO A: Análise do Solo e Propriedades dos Sedimentos

Tabela A.1 Análise básica dos solos Brunizém Vértico (Bv), Terra Roxa (Tr) e Vertissolo (V).

Solo	ANÁLISE BÁSICA										CTC	
	P	K	Argila	MO	pH	pH _{SMP}	Al	Ca	Mg	H+Al	pH 7	Efetiva
	mg/L		%				cmol/L					
Tr	8,9 A	71 M	56	2,9 M	6,2 A	6,3	0,0	6,5 A	1,8 A	2,7	11,8	9,1
Bv	6,5 MB	38 MB	05	2,4 B	5,9 M	6,3	0,0	3,3 M	1,4 A	2,7	7,7	4,9
V	7,3 M	73 M	42	4,7 M	5,5 B	6,0	0,3	30,9 A	12,7 A	3,6	47,6	44,3

Onde as letras à direita dos resultados são MB: Muito Baixo, B: Baixo, M: Médio, S: Suficiente e A: Alto. Por outro lado CTC é Capacidade de Troca de Cátions, Fósforo (P), Potasio (K), Matéria Orgânica (MO), Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg). O termo CTC pH 7,0 é Capacidade de Troca de Cátions a pH 7,0. Para CTC efetiva é a Capacidade de Troca de Cátions ao pH natural do solo.

Tabela A.2.- Resultado geral das massas específicas dos sedimentos Bv, Tr e V

Tipo de Solo	Classe	Massa Específica [g/cm ³]	Massa Específica media [g/cm ³]
Bv	AM	2,68	
Bv	AM	2,60	2,64
Bv	AF	2,66	
Bv	AF	2,69	2,67
Bv	AMF	2,72	
Bv	AMF	2,69	2,70
Bv	SA	2,47	
Bv	SA	2,46	2,47
Tr	AM	2,94	
Tr	AM	2,89	2,92
Tr	AF	2,89	
Tr	AF	2,90	2,90
Tr	AMF	3,07	
Tr	AMF	2,98	3,03
Tr	SA	2,63	
Tr	SA	2,67	2,65
V	AM	2,39	
V	AM	2,39	2,39
V	AF	2,41	
V	AF	2,43	2,42
V	AMF	2,42	
V	AMF	2,57	2,49
V	SA	2,26	
V	SA	2,23	2,25

ANEXO B
Análise da Água

ANEXO B: Análise da Água**- Dados Químicos da Água da Torneira**

pH= 6,67

Condutividade = 130 μ Ohms

Fluoretos = 0,92 mg/L F^{-1}

Cloretos = 23,49 mg/L Cl^{-1}

Nitratos = 4,38 mg/L NO_3^{-1}

Sulfatos = 52,18 mg/L SO_4^{-2}

Nitratos = ND (Não detectados; limite de detecção = 0,01 mg/L NO_2^{-1})

Fosfatos = ND (Não detectados; limite de detecção = 0,01 mg/L PO_4^{-1})

OD = 12,68 mg/L O_2

Ferro = 0,111 mg/L

Magnésio = 3,088 mg/L

Sódio = 37,931 mg/L

Cálcio = 0,584 mg/L

Fonte: Laboratório de Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas

ANEXO C
Propriedades Reológicas

ANEXO C : Propriedades Reológicas

C.1.- Dados Técnicos do Viscosímetro

Para a definição das propriedades reológicas do sedimento, foi utilizado um viscosímetro modelo LVD++ marca Brookfield de cilindros concêntricos com capacidade de 16 ml de amostra. As dimensões características deste equipamento são apresentadas na Tabela A.1, onde a' é o diâmetro do cilindro interno, b' é o diâmetro do cilindro externo e h' é a altura corrigida do cilindro interno.

Tabela C.1. Dimensões características do viscosímetro.

	[mm]
h'	92,39
b'	27,62
a'	25,15
s	1.098

C.2.- Procedimento para o Levantamento do Reograma

1. Selecionar o tipo de cilindro do viscosímetro a empregar, fazer a montagem e configurar o viscosímetro (consultar manual da Brookfield, 1998);
2. Programar o viscosímetro para que realize testes de medição de torque mínimo e máximo assim como imprimir as velocidades de rotação correspondentes (maiores informações do processo de programação do viscosímetro consultar manual da Brookfield, 1998);
3. Colocar a amostra agitada com concentração conhecida dentro de uma proveta calibrada de 16 ml. Verter dentro do cilindro maior fixo e encaixá-lo no viscosímetro (detalhes ver manual);
4. Aplicar os programas do passo 2
5. Digitar e analisar os dados impressos e definir os limites do teste ;
6. Programar o viscosímetro para fazer o teste de tixotropia ou reopexia;

7. Repetir o passo 3 e aplicar o programa do passo 6;
8. Fazer as impressões, digitar e fazer a análise dos dados no computador;
9. Caso a amostra apresente tixotropia ou reopexia o teste é dado por terminado. Caso contrário, continua-se com o passo 10;
10. Programa-se o viscosímetro para fazer o levantamento do reograma para a amostra em análise;
11. Aplica-se o programa do passo 10 e
12. Digitar e analisar os dados impressos no computador.

Detalhes específicos sobre a montagem, programação e cuidados do viscosímetro podem ser encontrados no manual da Brookfield (1998).

ANEXO D

Procedimento Experimental no Tubo de Griffith

ANEXO D: Procedimento Experimental no Tubo de Griffith

- Passos para o Uso do Tubo de Griffith com Água Limpa

1. Colocar o tubo sobre o tampão de borracha;
2. Empregando a alavanca de nível, procure encaixar a parte inferior do tubo à mesma fazendo uma certa pressão;
3. Encher o tubo com água limpa (destilada ou de torneira) pela parte superior da caixa de acrílico do aparelho de ingresso da amostra com a ajuda de um funil e uma mangueira. O nível da água deve estar alguns centímetros abaixo do copo;
4. Colocar a tampa superior da caixa de acrílico para isolar a coluna de água no tubo, emprega-se vaselina para vedação;
5. Conectar a bomba de vácuo na mangueira de saída com registro que se encontra do lado da caixa de acrílico;
6. Ligar a bomba com o registro fechado, após abrir o registro por uns 5 minutos a mais para remover bolhas de ar;
7. Fechar o registro e desligar a bomba. Desligar a mangueira da bomba e abrir o registro;
8. Encher com água a bandeja giratória do sistema de coleta de amostras, aproximadamente $\frac{3}{4}$ do volume total;
9. Colocar os recipientes pequenos dentro da bandeja. O número destes será estabelecido pelo usuário;
10. Pesar 5 gr de amostra seca de material grosso em estudo;
11. Colocar a amostra dentro do copo pela parte superior da caixa de acrílico;
12. Tampar a caixa e fechar o registro ao lado da caixa;
13. Uma vez conferido que a caixa esta totalmente selada, levantar a alavanca de nível do tubo. O tubo se solta do tampão mantendo a coluna de água em pressão negativa;
14. Para o início do teste, colocar a parte inferior do tubo sobre o primeiro recipiente pequeno. O nível da água deverá diminuir alguns centímetros;
15. Marcar o início do tempo no cronômetro simultaneamente à virada do copo que contém a amostra;
16. A cada certo intervalo de tempo* já estabelecido pelo usuário, girar rapidamente a bandeja, de modo que a parte inferior do tubo fique sobre o recipiente pequeno contínuo;
17. Repetir o passo anterior até atingir a última bandeja preestabelecida, nesta se deixará o tubo por alguns minutos a mais (10 minutos aproximadamente);

18. Transcorrido este tempo, encaixar novamente a parte inferior do tubo no tampão da bandeja giratória;
19. Retirar com muito cuidado os recipientes pequenos da bandeja e verter com ajuda de uma Piceta o material coletado em frascos Backer numerados;
20. Para a retirada da água do equipamento, abrir o registro da caixa de entrada de sedimento para eliminar a pressão negativa dentro do tubo, levantar o tubo lentamente com a alavanca e deixar que a coluna de água tenha descido totalmente. Após, conectar o dreno localizado no fundo da bandeja giratória com a bomba de drenagem. Resíduos de água no fundo devem ser limpados com um pano.

(*) Esse intervalo de tempo é determinado mediante testes prévios de ajuste, com material grosso da classe em análise, tomando-se como referência, o tempo que demorariam as diferentes partículas que fazem parte de uma classe para percorrer os dois metros do tubo de Griffith, para o cálculo deste tempo é empregada a fórmula de Concharov.

- Passos para o Uso do Tubo com Água com Sedimentos em Suspensão

1. Colocar o tubo sobre o tampão de borracha;
2. Empregando alavanca de nível, procurar encaixar a parte inferior do tubo à mesma fazendo uma certa pressão;
3. Encher com o fluido de mistura água-sedimento fino a bandeja giratória, aproximadamente $\frac{3}{4}$ do volume total;
4. Colocar os recipientes pequenos dentro da bandeja, o número destes será estabelecido pelo usuário;
5. Encher o tubo com o fluido de mistura de água-sedimento fino com sedimentos pela parte superior da caixa de acrílico do aparelho de introdução de amostra com a ajuda de um funil e uma mangueira. O nível da água deve estar alguns centímetros abaixo do copo;
6. Pesar 5 gr de amostra seca de material grosso em estudo;
7. Colocar a amostra dentro do copo pela parte superior da caixa de acrílico;
8. Tampar a caixa e fechar o registro do lado da caixa;
9. Uma vez conferido que a caixa está totalmente selada, levante a alavanca de nível do tubo, o tubo se soltará do tampão mantendo a coluna de água com sedimento em pressão negativa;
10. Para o início do teste colocar a parte inferior do tubo sobre o primeiro recipiente pequeno,

- o nível da água deve ter caído alguns centímetros;
11. Marcar o início do tempo no cronômetro simultaneamente à virada do copo que contém a amostra;
 12. A cada intervalo de tempo já estabelecido pelo usuário, girar rapidamente a bandeja, de modo que a parte inferior do tubo fique sobre o recipiente pequeno contínuo;
 13. Repetir o passo anterior até atingir a última bandeja, nesta se deixará o tubo por alguns minutos a mais (10 min aproximadamente);
 14. Transcorrido este tempo, encaixar novamente a parte inferior do tubo no tampão da bandeja giratória;
 15. Retirar com muito cuidado os recipientes pequenos da bandeja e verter com ajuda de uma Piceta o material coletado em uns frascos Backer numerados;
 16. Para a retirada da água do equipamento, abrir o registro da caixa de entrada de sedimento para eliminar a pressão negativa dentro do tubo, levantar o tubo lentamente com alavanca e deixar que a coluna de água tenha descido totalmente. Após, conectar o dreno localizado no fundo da bandeja giratória com a bomba de drenagem. Resíduos de água no fundo podem ser retirados com um pano.

Informações técnicas de construção do Tubo de Griffith, dados brutos e os resultados obtidos para o cálculo das velocidade estão disponíveis na versão final da tese, em CD.

ANEXO E

**Procedimentos das Medições dos Perfis de Velocidade e
Concentração**

ANEXO E: Procedimento da Medição dos Perfis de Velocidade e Concentração

- Procedimento de medição do perfil de velocidade em água limpa e com sedimento em suspensão

Serão descritos os passos para a aferição estática do Pitot e a medição da velocidade em água limpa e com sedimentos em suspensão.

- Calibração Estática do Pitot

1. Colocar o canal em uma declividade conhecida;
2. Instalar a ponta limimétrica desmontável e medir o fundo do canal;
3. Colocar o recipiente de acrílico sobre o canal abaixo do Pitot, com um nível de água de 2cm aproximadamente;
4. Mergulhar o Pitot dentro da água do recipiente (figuras E.1 e E.2);



Figura E.1.- Recipiente de acrílico para calibração estática

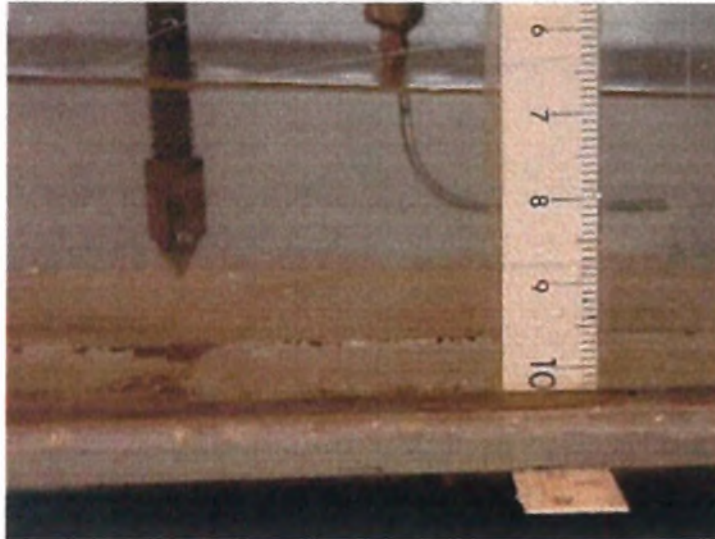


Figura E.2.- Detalhe do Pitot mergulhado no recipiente de acrílico.

5. Encher de água destilada o piezômetro inclinado pela parte superior com a ajuda de uma piceta e soprar fortemente. Repetir esta operação até que as bolhas de ar sejam totalmente retiradas, algumas bolhas deverão ser retiradas manualmente;
6. Uma vez drenado todo o ar, colocar um pouco de água no piezômetro inclinado. Esperar aproximadamente 5 minutos para avaliar como o menisco de água dentro do tubo desce e se estabiliza permanecendo constante. São realizadas leituras de controle a cada minuto, anotando o valor da cada leitura no piezômetro inclinado (figura E.3).

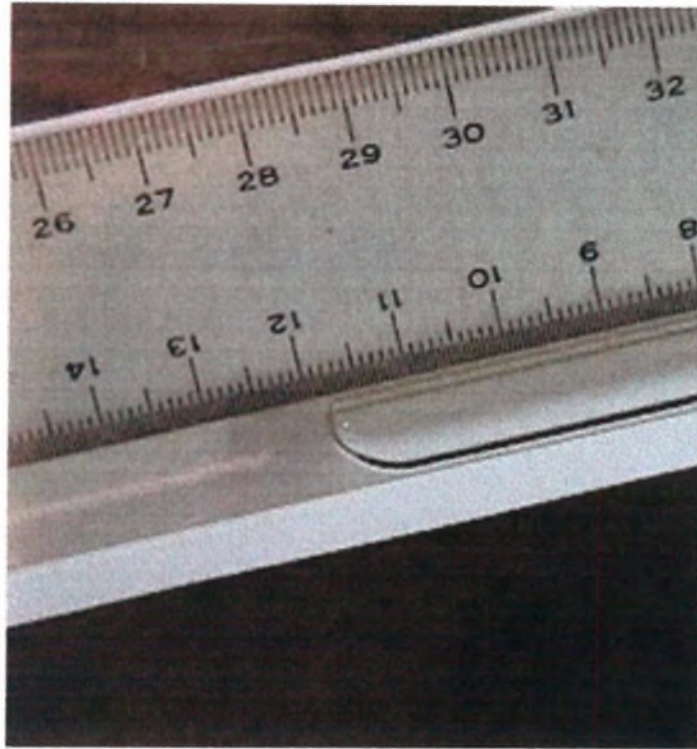


Figura E.3.- Detalhe do menisco de medição no tubo do piezômetro inclinado.



Figura E.4.- Medição da lâmina no recipiente de calibração.

7. Após alguns minutos, medir a altura da lâmina de água com a ponta (figura E.4);
8. Encher novamente o recipiente com um pouco mais de água (aproximadamente 3 mm a mais) e repetir o procedimento a partir do passo 4;
9. Os dados obtidos servirão como base para a construção de uma curva de calibração e

cujo cálculo é descrita no item 5.5.2.

- Medição do perfil de velocidade

1. Colocar o canal em uma declividade conhecida;
2. Instalar a ponta limimétrica desmontável e medir o fundo do canal;
3. Ligar a bomba e deixar o escoamento estabilizar;
4. Encher de água destilada o piezômetro inclinado pela parte superior com a ajuda de uma piceta. É necessário soprar fortemente para retirar todas as bolhas de ar. Repetir esta operação até que as bolhas de ar sejam totalmente retiradas; algumas bolhas serão retiradas manualmente;
5. Mergulhar o Pitot dentro da lâmina de água a uma profundidade conhecida (figura E.5.a);
6. Repetir o passo 4. Tendo certeza de que todo o ar tenha sido drenado, colocar um pouco de água no piezômetro inclinado, esperar 5 minutos para ver como o menisco de água dentro do tubo desce e se estabiliza permanecendo constante. São realizadas leituras de controle a cada minuto, anotando-se o valor da cada leitura no piezômetro inclinado;
7. Colocar o Pitot em outra profundidade conhecida e repetir o passo 6;
8. No final de todas as medições de profundidade, e após alguns minutos, medir a altura da lâmina de água com a ponta (figura E.5.b);

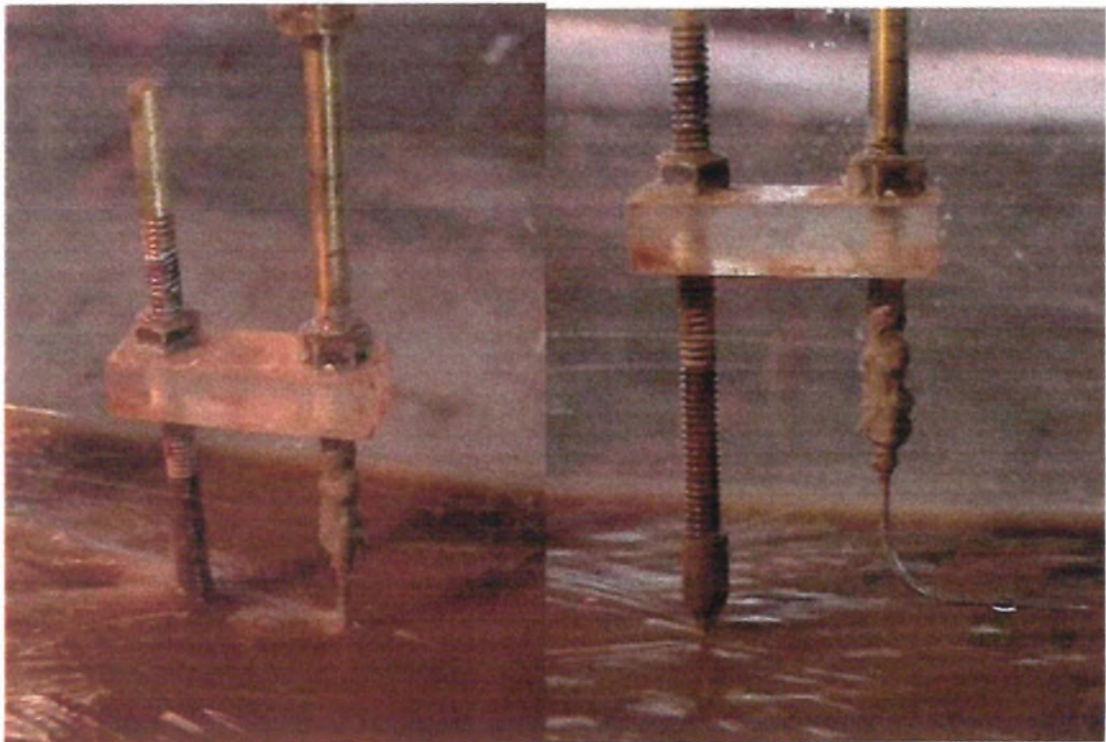


Figura E.5.- Tubo Pitot: a) submerso no escoamento e, b) medição da altura da lâmina do escoamento.

9. Esta metodologia pode ser empregada tanto em água limpa como em um escoamento com sedimentos.
10. No final do levantamento do perfil de velocidade se procede à determinação da vazão mediante o método volumétrico.

- Medição da Concentração no Escoamento

1. Tomando como referência a altura da lâmina de escoamento medido com a ponta linimétrica, estabelece-se a quantidade possível de pontos para medição.
2. Posiciona-se a sonda coletora de sedimento em uma profundidade desejada mediante as leituras do paquímetro.
3. Uma garrafa de coleta de sedimentos é colocada em um nível inferior à cota da superfície do escoamento, esta possui um tampão com dois bicos de saída.
4. A sonda é ligada a uma garrafa de coleta mediante uma mangueira de silicone em uns dos bicos de saída.
5. Para iniciar a coleta em si, realiza-se uma leve sucção no outro bico da garrafa, cria-se uma drenagem por sifonamento. Interrompe-se a coleta quando a garrafa este quase cheia.
6. Repeti-se os passos 1 ao 5 com o ponto de coleta seguinte.
7. A concentração total do escoamento é mediante uma amostra retirada de um volume total obtido em um balde graduado colocado no final do canal.

Informações técnicas de construção do canal, tubo de Pitot, coletor de sedimentos, dados brutos e os resultados obtidos para o cálculo dos perfis de velocidade e concentração estarão disponíveis na versão em CD.