



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Estudo Teórico-Experimental para a
Determinação da Velocidade de
Frentes de Lama Escoando em
Canais**

Silvio Toshio Yabuchi

1210001539



Ilha Solteira - SP





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Estudo Teórico-Experimental para a Determinação da Velocidade de Frentes de Lama Escoando em Canais

SÍLVIO TOSHIO YABUCHI

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil – Ênfase em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

ORIENTADOR : Prof. Adj. Geraldo de Freitas Maciel

Ilha Solteira
Novembro de 2004

Proc. 055/2005 - NRD 004/05

UNESP - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA	
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
22.12.04	28.02.05
REGISTRADO POR	TOMBO
Ailza	Tx. 1539
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Ilustração Autor R\$10,00	Y11e

1210001539



Co sup 322692
sup 58854

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Yabuchi, Sílvio Toshio

Y11e Estudo teórico-experimental para a determinação da velocidade de frentes de lama escoando em canais / Sílvio Toshio Yabuchi. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2004
xii, 84 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004

Orientador: Geraldo de Freitas Maciel

Bibliografia: p. 79-84

1. Mecânica dos fluidos. 2. Velocidade de propagação de ondas. 3. Fluidos não-newtonianos.

30104009



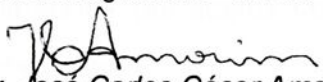
Estudo Teórico-Experimental para a Determinação da Velocidade de Frentes de Lama Escoando em Canais

Silvio Toshio Yabuchi

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DO
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel – UNESP/Ilha Solteira
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia - UNESP – Câmpus de Ilha Solteira


Prof. Dr. José Carlos César Amorim – IME/RJ
Professor Doutor do Instituto Militar de Engenharia
IME – Rio de Janeiro/RJ


Prof. Dr. Milton Dall'Aglio Sobrinho – UNESP/Ilha Solteira
Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia - UNESP – Câmpus de Ilha Solteira

Ilha Solteira/SP, setembro de 2004.



AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

Aos meus pais, pelo carinho e paciência.

Às minhas irmãs Célia, Carla e Amanda pelo apoio e confiança.

À minha noiva, Vânia, pela compreensão e dedicação de carinho em todos os momentos.

Ao professor Geraldo de Freitas Maciel, por toda paciência e orientação, na execução dessa dissertação de mestrado, e também, pelo aprendizado na qualidade de amigo e conselheiro.

À equipe de trabalho, Cléber Fábio Batista Perez, Hamilton dos Santos Kiryu, André Luís de Oliveira Souza, e demais colegas, por toda ajuda no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao CNPq-CT-Hidro pelo apoio fornecido, na forma de bolsa de mestrado, que possibilitou a realização desta pesquisa.

À banca examinadora, por aceitar contribuir na discussão e certamente no enriquecimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, professores e funcionários.





Estudo Teórico-Experimental para a Determinação da Velocidade de Frentes de Lama Escoando em Canais

Resumo

O presente trabalho surgiu da motivação em se investigar mais detalhadamente leis de comportamento de fluidos hiperconcentrados evoluindo em canais e, notadamente a dinâmica de frentes hiperconcentradas resultantes de ruptura de barragem.

De uma maneira geral, e dentre os diversos estudos de caso que podem ser delineados nesse contexto (reologia não-Newtoniana), duas vertentes podem ser pontuadas: um estudo bifásico (fração sólida / fração líquida) em regime turbulento, clássico das rupturas de barragens ou um estudo monofásico (de matriz argilosa) em regime ainda laminar e de propriedades viscosas ou visco-plásticas. A partir dessa segunda vertente, uma abordagem teórico-experimental do transitório (onda produzida pelo içamento de uma comporta), torna-se um estudo de caso pertinente e interessante.

Numa 1ª etapa desenvolve-se uma nova aproximação teórica para a velocidade de propagação da frente de onda de lama, que leva em consideração o efeito das dissipações viscosas. Estabelecem-se leis de evolução dessas frentes em função, cuja sensibilidade de parâmetros é diagnosticada, além de serem sistematicamente comparadas com expressões encontradas na literatura.

Numa 2ª etapa, determinam-se através de ensaios de reometria de precisão, os parâmetros (viscosidade aparente, tensão crítica de cisalhamento e curva de tensão de cisalhamento x taxa de deformação) de misturas Newtonianas



(água + açúcar) e não-Newtoniana (água + argila caulínica). Essas misturas (com elevadas concentrações: $5\% < C_v < 20\%$) já caracterizadas, são ensaiadas em regime transiente em canaletes de seção retangular e declividade distinta, montadas para esse fim.

Uma confrontação teórico-experimental é empreendida, apontando resultados promissores, mas recomendando melhorias no aparato experimental, sobretudo no sistema de captura de imagens.

Palavras-chave: fluidos hiperconcentrados, lamas, velocidade de propagação, ruptura de barragem, reometria.





A THEORETICAL-EXPERIMENTAL STUDY FOR THE DETERMINATION THE FRONT VELOCITY OF MUD FLOWING IN CHANNELS

Abstract

The present study appeared of the motivation about knowing in a realistic way, behavior's laws of hyperconcentrated fluids developing in channels, especially the dynamics of resulting fronts of mud of dam break.

In a general way, and among the several case studies that can be delineated in that context (non-Newtonian rheology), two axes should be punctuated: a biphasic study (solid fraction / liquid fraction) in turbulent regime, classic of the dam break problem or a monophasic study (clay + water matrix) in laminar regime viscous or viscoplastic properties. From that second axe, a theoretical-experimental approach of the transitory (wave produced by the breaking of a dam), becomes a study of pertinent and interesting case.

In a first stage has been developed a new theoretical approach for the front velocity of wave of mud taking into account the effect of the viscous dissipations. It settles down laws of evolution of those fronts in function of the time, whose sensibility of parameters is diagnosed besides they are compared systematically with others purposes found in the literature.

In a second stage, they were determined, through rheometric tests, the parameters (apparent viscosity, critical shear-stress, index of flow, consistence, index flow and curve of shear-stress x shear rate) of Newtonian (water + sugar) and non-Newtonian mixtures (water + kaolinitic clay). Those mixtures (with a large range of concentrations ($5\% < C_v < 20\%$) already characterized, were





tested, in transient regime, flowing in small flumes of rectangular section and different slopes, made for that thing.

A theoretical-experimental confrontation is undertaken, pointing promising results, but recommending improvements in the experimental apparatus, mainly in capture's system of images.

Word key: hyperconcentrated fluids, mud, fronts velocity propagation, dam break, rheometry.





Lista de Símbolos

Re - Número de Reynolds;

t_c - Tempo característico;

u - Velocidade ao longo do canal;

h - Profundidade do escoamento;

g - aceleração da gravidade;

h_0 - Profundidade inicial no reservatório;

C_0 - Coeficiente de Chézy;

C - Celeridade;

θ - Coeficiente de forma;

S_0 - Declividade do canaleta;

Δt - Variação de tempo;

α - Ângulo formado entre o fundo do canaleta e a horizontal;

φ - Coeficiente de forma próprio à ruptura de barragem;

τ_c - Tensão crítica de cisalhamento;

ρ - Massa específica do fluido;

v - Velocidade ao longo da vertical no canaleta;

p - Campo de pressão;

μ - Viscosidade dinâmica;

t' - Tempo adimensional;

x'_t - Posição da frente de onda adimensional, no tempo t' ;

L - Comprimento total do canaleta;

t^* - Tempo adimensional, a partir do instante da ruptura;

x_t^* - Posição da frente de onda, adimensional, no tempo t^* ;

$\chi_1(m^*)$ - Constante;

$\chi_2(m^*)$ - Constante;

m - Índice de escoamento de Herschel-Bulkley ou parâmetro de Herschel-Bulkley;

$\tilde{t}$ - Tempo adimensional, a partir do instante da ruptura;

$\tilde{x}_f(t)$ - Posição da frente de onda, adimensional, no tempo $\tilde{t}$, a partir de $x = 0$;

$\tilde{c}_1 m^*$ - Constante;

$\tilde{c}_2(m^*)$ - Constante;

$\hat{t}$ - Tempo adimensional, a partir do instante da ruptura;

$\hat{x}_f(\hat{t})$ - Posição da frente de onda, adimensional, no tempo $\hat{t}$, a partir de $x = 0$;

$\hat{c}_f(m^*)$ - Constante;

$a(m^*)$ - Constante;

$\hat{c}_2(m^*)$ - Constante de integração;

F_i - Forças de campo;

T_{ij} - Tensor de tensões;

τ - Tensão de cisalhamento;

$\dot{\gamma}$ - Taxa de deformação;

μ_0 - Viscosidade a taxas de deformação próximas de zero;

μ_∞ - Viscosidade a taxas de deformação próximas de valores infinitos ou muito grandes;

μ_b - Viscosidade dinâmica do modelo Bingham e Green (1920);

k_m - Índice de consistência de Herschel-Bulkley (1926);

h - Altura total do canaleta;

L_R - Comprimento do reservatório;

C_m - Concentração em massa;

C_v - Concentração em volume;

%w - Porcentagem de água na mistura;

%S - Porcentagem de solo seco;

V_{solo} - Volume de solo na mistura;

$V_{\text{água}}$ - Volume de água na mistura;



M_d - Massa de solo seco;

ρ_s - Massa específica dos grãos;

M_p - Massa de solo a ser pesado;

$M_{\text{água}}$ - Massa de água a ser adicionada ao solo;

ρ_w - Massa específica da água;

$\%_w$ - Teor de umidade no solo;

U - Velocidade durante o escoamento;

H - Profundidade durante o escoamento;

M - Massa total por unidade de largura;

P - Quantidade de movimento;

F - Força horizontal resultante;

A - Posição da frente da onda em variável adimensional;

T - Tempo adimensional;

K_1 - Constante em função do índice de consistência;

K_2 - Constante em função do índice de consistência;

$\dot{A}$ - Derivada primeira de A em relação a T ;

$\ddot{A}$ - Derivada segunda de A em relação a T ;



Lista de Figuras

FIGURA 1 - ESCOAMENTO DE LAMA CAUSADO PELA CHUVA NUMA REGIÃO MONTANHOSA.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 2A - EVOLUÇÃO DA FRENTE DE ONDA.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 2B - EVOLUÇÃO DA FRENTE DE ONDA, SEGUNDO WHITHAM (1954).....	5
FIGURA 3 - CONDIÇÕES DE CONTORNO SEGUNDO NSOM.....	7
FIGURA 4A - ESCOAMENTO DE ÁGUA, ÓLEO, MEL E LAMA.....	14
FIGURA 4B - ESCOAMENTO DE LAMA (NÃO-NEWTONIANA) E ÁGUA COM CORANTE (NEWTONIANA).....	14
FIGURA 5 - REOGRAMA DE DIFERENTES FLUIDOS.....	19
FIGURA 6 - CANALETE 1 E 2.....	21
FIGURA 7 - SOLENÓIDE.....	22
FIGURA 8A - DISPOSITIVO UTILIZADO PARA DAR A INCLINAÇÃO DO FUNDO DO CANALETE.	22
FIGURA 8B - DISPOSITIVO QUE PERMITE VARIAR A INCLINAÇÃO DO FUNDO DO CANALETE, A JUSANTE DA BARRAGEM.....	23
FIGURA 9 - BOMBA E O RESERVATÓRIO ONDE SE PREPAROU A MISTURA ÁGUA + ARGILA CAULÍNICA.....	23
FIGURA 10 - FILMADORA DIGITAL UTILIZADA NAS FILMAGENS DOS ENSAIOS DE RUPTURA DE BARRAGEM.....	24
FIGURA 11 - REÔMETRO R/S DE CILINDROS COAXIAIS UTILIZADO NOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA.....	25
FIGURA 12 - TESTE DE CALIBRAÇÃO DO REÔMETRO - MISTURA ÁGUA + AÇÚCAR COM $C_M = 60\%$	26
FIGURA 13 - CALIBRAÇÃO DO REÔMETRO COM O AUXÍLIO DE PRODUTO ESPECIFICADO.....	27
FIGURA 14 - "SPINDLES" UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE REOMETRIA.....	28
FIGURA 15 - BANHO TÉRMICO UTILIZADO NO CONTROLE DE TEMPERATURA DO REÔMETRO.....	29
FIGURA 16 - PLANILHA PARA CÁLCULO DAS MASSAS A SEREM UTILIZADAS NA PREPARAÇÃO DE MISTURAS.....	32
FIGURA 17A - COLOCAÇÃO DO PROBLEMA PARA $T = 0$ E CANAL.....	33



FIGURA 17B - FOTO DO CANALETE 2, UTILIZADO NOS ENSAIOS DE RUPTURA DE BARRAGEM.	34
FIGURA 18 - APARATO EXPERIMENTAL PARA FILMAGEM DE ENSAIO DE RUPTURA.	34
FIGURA 19 - EVOLUÇÃO DA FRENTE DE ONDA.	36
FIGURA 20 - SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO PARA DIFERENTES ALTURAS INICIAIS NO RESERVATÓRIO.	45
FIGURA 21 - SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO PARA DIFERENTES ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA (K_M).	46
FIGURA 22 - SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO PARA DIFERENTES ÍNDICES DE ESCOAMENTO DE HERSCHEL-BULKLEY.	47
FIGURA 23 - SENSIBILIDADE DO MODELO PROPOSTO PARA DIFERENTES MASSAS ESPECÍFICAS DO FLUIDO.	47
FIGURA 24 - VARIAÇÃO DAS CURVAS (TENSÃO X DEFORMAÇÃO) EM FUNÇÃO DO PH $C_v = 10\%$	49
FIGURA 25 - VARIAÇÃO DAS CURVAS (TENSÃO X DEFORMAÇÃO) EM FUNÇÃO DO PH $C_v = 15\%$	50
FIGURA 26 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA C_v NA CURVA REOLÓGICA.	50
FIGURA 27 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA C_m NA CURVA REOLÓGICA.	51
FIGURA 28 - ANÁLISE DE TIXOTROPIA SEM INTERVALO DE TEMPO ENTRE CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO.	53
FIGURA 29 - ANÁLISE DE TIXOTROPIA COM INTERVALO DE 10 S DE REPOUSO.	53
FIGURA 30 - ANÁLISE DE TIXOTROPIA COM INTERVALO DE 30 S DE REPOUSO.	54
FIGURA 31 - VARIAÇÃO DAS CURVAS DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA $C_v = 10\%$ EM ESCALA NORMAL.	55
FIGURA 32 - VARIAÇÃO DAS CURVAS DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA $C_v = 10\%$ EM ESCALA LOGARÍTIMICA.	55
FIGURA 33 - ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO MODO DE PREPARO.	56
FIGURA 34 - ENSAIO NO CANAL PILOTO DA MISTURA ÁGUA + ARGILA CAULINÍTICA.	57
FIGURA 35 - ENSAIO NO CANAL PILOTO DA MISTURA ÁGUA + ARGILA CAULINÍTICA, ILUSTRANDO A EVOLUÇÃO DA FRENTE PRODUZIDA PELO IÇAMENTO DA COMPORTA ("RUPTURA").	57
FIGURA 36 - VISTA FRONTAL DO ENSAIO COM A MISTURA ÁGUA + ARGILA CAULINÍTICA.	57

FIGURA 37 - COMPARAÇÃO DA POSIÇÃO DA FRENTA DE ONDA EXPERIMENTAL X_F EM FUNÇÃO DO TEMPO COM AS SOLUÇÕES TEÓRICAS DE RITTER (1892) E PIAU (1995).....	58
FIGURA 38 - EVOLUÇÃO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DA FRENTA DA ONDA V_F EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	59
FIGURA 39 - VISTA FRONTAL DO ENSAIO COM A MISTURA ÁGUA + ARGILA CAULÍNÍCA	59
FIGURA 40 - EVOLUÇÃO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DE FRENTA DE ONDA.....	60
FIGURA 41 - VISTA FRONTAL DO ENSAIO COM A MISTURA ÁGUA + ARGILA CAULÍNÍCA	60
FIGURA 42 - EVOLUÇÃO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DA FRENTA DA ONDA V_F EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	61
FIGURA 43 - COMPARAÇÃO DA POSIÇÃO DA FRENTA DE ONDA EXPERIMENTAL X_F EM FUNÇÃO DO TEMPO COM AS SOLUÇÕES TEÓRICAS DE RITTER (1892) E PIAU (1995).....	61
FIGURA 44 - EVOLUÇÃO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DA FRENTA DA ONDA V_F EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	62
FIGURA 45 - COMPARAÇÃO DA POSIÇÃO DA FRENTA DE ONDA EXPERIMENTAL X_F EM FUNÇÃO DO TEMPO COM AS SOLUÇÕES TEÓRICAS DE RITTER (1892) E PIAU (1995).....	62
FIGURA 46 - EVOLUÇÃO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DA FRENTA DA ONDA V_F EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	63
FIGURA 47 - COMPARAÇÃO DA POSIÇÃO DA FRENTA DE ONDA EXPERIMENTAL X_F EM FUNÇÃO DO TEMPO COM AS SOLUÇÕES TEÓRICAS DE RITTER (1892) E PIAU (1995).....	63
FIGURA 48 - EVOLUÇÃO TEMPORO-ESPACIAL DA VELOCIDADE DA FRENTA DE ONDA.....	64
FIGURA 49 - EVOLUÇÃO TEMPORO-ESPACIAL DAS CURVAS DE RITTER (1892), EXPERIMENTAL E PROPOSTA TEÓRICA.....	65
FIGURA 50 - EVOLUÇÃO TEMPORO-ESPACIAL DAS CURVAS DE RITTER (1892), EXPERIMENTAL E PROPOSTA TEÓRICA.....	66
FIGURA 51 - EVOLUÇÃO TEMPORO-ESPACIAL DAS CURVAS DE RITTER (1892), EXPERIMENTAL E PROPOSTA TEÓRICA.....	66
FIGURA 52 - EVOLUÇÃO TEMPORO-ESPACIAL DAS CURVAS EXPERIMENTAIS COM INCLINAÇÃO VARIÁVEL	67

FIGURA 53 - EVOLUÇÃO TEMPORO-ESPACIAL DAS CURVAS EXPERIMENTAIS COM INCLINAÇÃO VARIÁVEL	68
FIGURA 54 - EVOLUÇÃO TEMPORO-ESPACIAL DAS CURVAS EXPERIMENTAIS COM H_0 VARIÁVEL.....	69
FIGURA 55 - EVOLUÇÃO TEMPORO-ESPACIAL DAS CURVAS EXPERIMENTAIS COM H_0 VARIÁVEL.....	69
FIGURA 56- EVOLUÇÃO TEMPORO-ESPACIAL DAS CURVAS EXPERIMENTAIS COM C_v VARIÁVEL.....	70
FIGURA 57 - EVOLUÇÃO TEMPORO-ESPACIAL DAS CURVAS EXPERIMENTAIS COM C_v VARIÁVEL.....	70
FIGURA 58 – VELOCIDADE DA FRENTE DE ONDA TEÓRICA DE RITTER (1892), PIAU (1995), EXPERIMENTAL E A PROPOSTA TEÓRICA.....	75



Lista de Quadros

QUADRO 1 – VALORES DA VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	26
QUADRO 2 – VALORES DA VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	27
QUADRO 3 – SISTEMA DE MEDIÇÃO X “SPINDLES”	28
QUADRO 4 – FAIXAS DE TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO SEGUNDO O FLUIDO DE CONTROLE.....	29



Sumário

I Motivação.....	1
II Revisão bibliográfica.....	3
III Material e Método	13
3.1 - Conceitos Básicos	13
3.1.1 - Fluido	13
3.1.2 - Viscosidade	13
3.1.3 - Tixotropia	15
3.1.4 - Hipótese do Meio Contínuo	15
3.1.5 - Princípios de Conservação.....	15
3.1.5.1 - Conservação da Massa	16
3.1.5.2 - Conservação da Quantidade de Movimento.....	16
3.1.6 - Introdução às leis da Reologia	16
3.1.6.1 - Reometria	16
3.1.6.2 - Modelos Reológicos	18
3.1.6.3 - Estratégias de Medição	20
3.2 - Material	20
3.2.1 - Aparato experimental	20
3.2.1.1 - Canaletes	20
3.2.1.2 - Solenóide.....	21
3.2.1.3 - Dispositivos de ajuste de inclinação do canaleta	22
3.2.1.4 - Bomba e tanque de preparo das misturas.....	23
3.2.1.5 - Filmadora.....	24
3.2.1.6 - Reômetro	24
3.2.1.7 - Calibração do reômetro	25
3.2.1.8 - "Spindles"	28
3.2.1.9 - Banho térmico.....	29
3.3 - Métodos	30
3.3.1 - Preparo das misturas	30
3.3.2 - Procedimento experimental para os ensaios de ruptura	33



IV abordagem teórica para a determinação da velocidade da frente de material viscoso e visco-plástico (LAMA)	36
4.1 – Proposta de modelagem	36
4.2 - Estudo de caso particular:	38
4.3 - Técnicas de resolução	42
4.4 – Determinação da velocidade da frente de material viscoso e visco-plástico. 44	
4.4.1 - Teste de sensibilidade de parâmetros da proposta teórica de determinação da velocidade da frente de material viscoso e visco-plástico	45
V resultados experimentais da caracterização reológica da mistura água + argila caulínica	49
5.1 - Análise do pH.....	49
5.2 - Influência da concentração em volume para mistura água + argila caulínica	50
5.3 - Influência da concentração em massa para mistura água + açúcar.....	51
5.4 - Análise da ocorrência de tixotropia.....	52
5.5 - Análise da variação da temperatura	54
5.6 - Influência do modo de preparo.....	56
5.7 – Análise da dinâmica da ruptura de barragem com material visco-plástico....	56
5.7.1 - Canaleta 1	58
5.7.1.1 - Comentário dos resultados obtidos a partir dos ensaios preliminares	64
5.7.2 - Canaleta 2	65
VI Discussão dos resultados experimentais.....	72
6.1 - Da reologia do material ensaiado	72
6.2 - Influência da concentração para mistura água + argila caulínica.....	72
6.3 - Análise da variação do pH.....	72
6.4 - Análise da variação da temperatura	73
6.5 - Dos ensaios de ruptura com material visco-plástico (análise da mistura água + argila caulínica)	73
6.5.1 - Canaleta 1	73
6.5.2 - Canaleta 2	74
6.5.3 – Da influência da tensão reduzida τ_0/ρ	75
VII CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS	77



VIII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
IX – BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	81



I MOTIVAÇÃO

Sabe-se que o fenômeno de ruptura de barragem gera fluxos que, por incorporação de massa, pode resultar em formação de frentes hiperconcentradas, em geral, devastadoras, principalmente para as zonas situadas imediatamente a jusante da barragem, podendo afetar o meio ambiente de forma violenta devido às elevadas velocidades do escoamento e à subida acelerada dos níveis de água.

Os primeiros estudos consistentes sobre o assunto iniciaram há mais de um século e têm avançado tanto em modelagem física quanto em numérica nas últimas décadas. Em decorrência da ruptura, uma frente de onda é produzida avançando e provocando, quase sempre, perdas de vidas humanas, bens, infra-estrutura e impactos ambientais.

Dentro deste contexto, citam-se, mais recentemente, os acidentes ocorridos com duas empresas mineiras - Mineração Rio Verde, ocorrido em 2001, e Indústria Cataguazes de Papel, em abril de 2003, que pela ruptura de suas barragens de rejeito, ocasionaram problemas graves de ordem ambiental. Soma-se a esses o acidente ocorrido na cidade de Camará, na Paraíba, na segunda quinzena do mês de junho de 2004, onde houve uma ruptura de barragem que acarretou inúmeros prejuízos dentre os quais alguns irreparáveis, como a morte de mais de vinte pessoas.

A lista de catástrofes ocasionadas pela ruptura instantânea ou gradual de uma barragem é maior do que parece e como se sabe, os problemas relativos a esse fenômeno jamais foram resolvidos completamente devido ao elevado número de parâmetros intervenientes, tais como, variabilidade do solo, modos de ruptura, manutenção das obras, etc.

Na mesma intensidade, as barragens de rejeito são inúmeras, assim como o número de acidentes, ainda que não reportados. Pela natureza do material



represado, estas obras conduzem, quando acidentadas, fluxos de natureza hiperconcentrada, quiçá, laminar. Dessa forma, este trabalho surgiu da motivação e interesse em se conhecer de maneira mais afinada leis de comportamento de fluidos hiperconcentrados evoluindo em canais, notadamente a dinâmica rápida de frentes resultantes de ruptura, tipo barragem.

De uma maneira geral, os fluidos resultantes de misturas de fluido Newtoniano e de partículas sólidas aparecem com frequência na natureza e na indústria. Os escoamentos dessas misturas apresentam, via de regra, características de regime turbulento, mas não em menor grau as frentes hiperconcentradas podem conferir regime laminar. Quando esses fluidos são abordados, identificam-se fenômenos associados a assoreamento em reservatórios, deposição em canais de irrigação, transporte em condutos (hidrotransporte), liqüefação das areias, ações erosivas das voçorocas (Figura 1) e das lavas torrenciais - esse verdadeiro "mar de lama" e destroços que sazonalmente vem banindo a vida de centenas de pessoas no cenário nacional e internacional.

Assim exposto, diagnosticar frentes viscosas e visco-plásticas, principalmente sua velocidade de propagação em regime transiente (instantes subseqüentes à ruptura), é assunto atual e importante na fronteira da hidráulica clássica e hidrodinâmica, assunto este tratado nesta dissertação.



Figura 1 - Escoamento de lama causado pela chuva numa região montanhosa.

(Fonte: www.geocities.com/rainforest/8211/siano2.htm)

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Tratar a evolução da frente hiperconcentrada (material visco-plástico) é assunto que traz à discussão efeitos de inércia, atrito ou resistência viscosa, força gravitacional, tensões críticas e tensões de deformação.

Apresenta-se neste item uma revisão bibliográfica condensada de trabalhos a partir dos quais extraímos diretrizes para a formulação da proposta dessa pesquisa.

No caso de um canal horizontal largo e sem resistência, a solução analítica do problema da onda de ruptura foi estabelecida, pela primeira vez, por Ritter (1892). Sua solução corresponde à situação predominantemente inercial ($Re \rightarrow \infty$) ou $(t_c / Re) \rightarrow 0$, t_c : tempo característico. Com base no sistema de equações “shallow-water”, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 && \text{(conservação da massa)} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} &= 0 && \text{(conservação da quantidade de movimento)} \end{aligned} \quad (2.1)$$

onde u é a velocidade, h a profundidade do escoamento e g a aceleração da gravidade.

Entre as duas extremidades $(-\sqrt{gh_0})t$ e $2\sqrt{gh_0}t$, conforme a Figura 2, a profundidade e a velocidade são dadas, segundo Ritter (1892), por:

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{2}{3} \left(\frac{x}{t} + \sqrt{gh_0} \right) \\
 \sqrt{gh} &= \frac{1}{3} \left(2\sqrt{gh_0} - \frac{x}{t} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

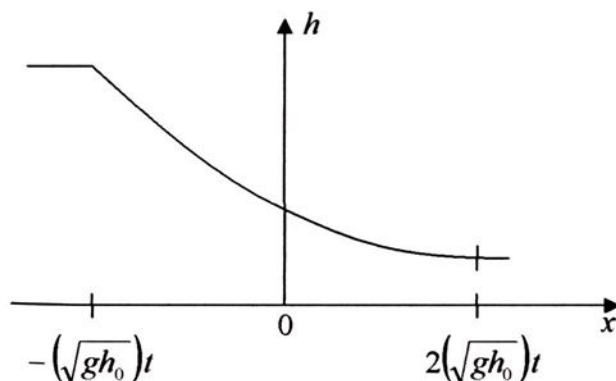


Figura 1a - Evolução da frente de onda

Dressler (1952), com base em resultados experimentais, colocou em evidência a solução de Ritter, introduzindo um termo de resistência em função do coeficiente de Chézy, que resultou em:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 && \text{(conservação da massa)} \\
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{ku^2}{h} &= 0 && \text{(conservação da quantidade de movimento),}
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

onde $k = \frac{g}{C_0^2}$, C_0 é o coeficiente de Chézy e k um adimensional.

Para este sistema, Dressler propôs uma solução analítica aproximada obtida por aproximações sucessivas.

Whitham (1954), sob as mesmas considerações de Dressler, mas utilizando uma nova estratégia, chegou a um resultado ligeiramente diferente. O método utilizado por este pesquisador consistiu em dividir a onda em duas partes: uma primeira que desprezava o atrito ($x < f_1(t)$), conforme a Figura 2b e uma segunda - frente da onda - $f_2(t)$, onde o considerava - esta região ($f_1(t) < x < f_2(t)$) é

denominada zona de camada limite. Nesse caso, a solução foi obtida pelo método de “Pohlhausen”.

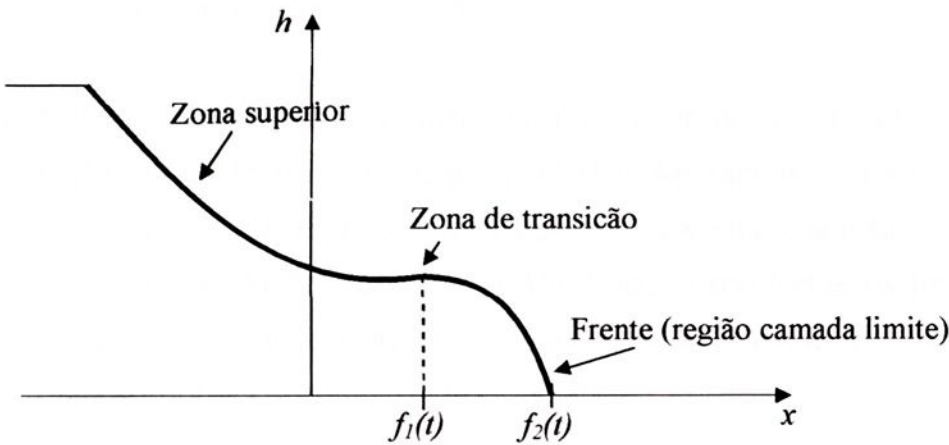


Figura 2b - Evolução da frente de onda, segundo Whitham (1954).

Citam-se também, os estudos de Su e Barnes (1970, 1977) que, utilizando séries de perturbações, extrapolam a solução de Dressler para canais em declive. Esses autores trabalharam com seção transversal retangular, triangular e parabólica. O grupo de equações utilizadas por Su e Barnes era da forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

(conservação da massa)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2C}{c^2} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{g^2}{C_0^2} (\theta_0 + \theta_1 C_*^1 + \theta_2 C_*^2 + \dots) \frac{u^2}{C^2} - g S_0 = 0$$

(conservação da quantidade de movimento)

(2.4)

onde $C = c\sqrt{gh}$ é a celeridade, c = constante (que depende da geometria do canal), e C_* é dado por:

$$C_* = c \left(\frac{\sqrt{gh}}{\sqrt{gh_0}} \right)$$

(2.5)

S_0 : declividade do canal e,

$\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots$: são constantes de forma.



As soluções analíticas apontadas nos trabalhos dos autores supracitados são válidas para regimes transientes e para os primeiros instantes subseqüentes ao acidente ($\Delta t \rightarrow 0$). Para intervalos de tempo superiores ($\Delta t \gg 1$), soluções com aproximações assintóticas foram propostas.

Hunt (1982) questiona sobre a validade, para tempos $\Delta t \gg 1$, das soluções apontadas por Dressler (1952) e por Su et. al. (1970). Apresenta uma solução que só teria validade se a frente da onda de ruptura percorresse uma distância superior a quatro vezes o comprimento do reservatório. Hunt desprezou todos os termos de aceleração da equação da quantidade de movimento e apresenta, em 1983, uma solução aproximada conhecida como “onda cinemática”.

Piau (1995) propõe uma solução analítica levando em consideração a contribuição da tensão normal devido ao patamar crítico (existência de τ_c), cuja expressão da velocidade de propagação da frente da onda de ruptura é dada por:

$$u = 2 \sqrt{gh_0 \cos \alpha - \frac{\varphi \tau_c}{\rho}} \quad (2.6)$$

onde:

h_0 : profundidade inicial do escoamento;

α : declividade do canal com a horizontal;

φ : coeficiente de forma próprio à ruptura de barragem;

τ_c : tensão crítica de cisalhamento do fluido;

ρ : massa específica do fluido.

Nsom et. al. (2000) fez um estudo para uma série de fluxos de fluido Newtoniano (água + glucose) gerados a partir do colapso de uma barragem em um canal inclinado. No plano teórico, foi utilizado o sistema de equações de Navier-Stokes, a saber:



$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{conservação da massa}) \quad (2.7)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho g \sin(\alpha) + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{conservação da QDM em x})$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} - \rho g \cos(\alpha) + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{conservação da QDM em y}) \quad (2.8)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (\text{conservação da QDM em z})$$

onde QDM é a abreviatura de quantidade de movimento, u é a componente da velocidade ao longo do comprimento do canal, v a componente da velocidade na vertical, p denota o campo de pressão, ρ a massa específica do fluido e μ a viscosidade dinâmica.

As equações utilizadas por Nsom et. al. (2000) foram devidamente interpretadas adimensionalmente no regime viscoso e resolvidas com aproximação unidimensional e hipótese de águas pouco profundas.

No estudo experimental, Nsom et. al. (2000) construiu um canal retangular de acrílico com 5 m de comprimento, 0,30 m de largura e 0,08 m de altura. A Figura 3 ilustra a alocação da barragem no canal.

Uma câmera filmadora ultra-rápida foi usada neste trabalho (1000 imagens / segundo) para gravar o fluxo gerado pela ruptura da barragem. As imagens eram mostradas em monitor para controlar a qualidade da filmagem, que, posteriormente eram tratadas usando o software Visilog 4.

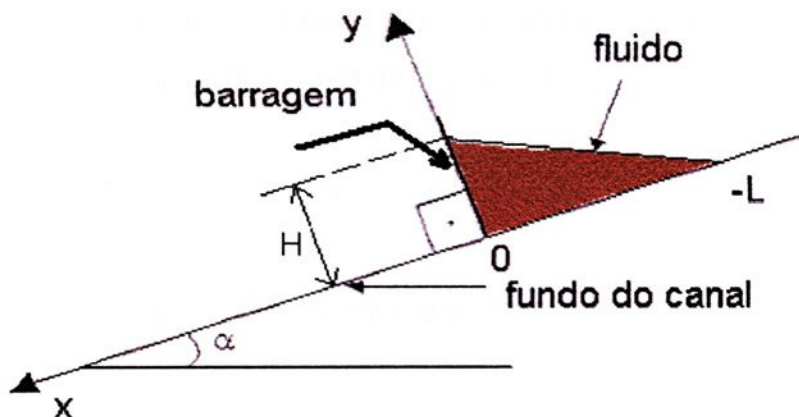


Figura 2 - Condições de contorno segundo Nsom (2000).

Os resultados obtidos por Nsom et. al. (2000) para o canal na posição horizontal e inclinada foram os seguintes:

- Posição horizontal

Dois regimes foram bem identificados: regime inercial e o regime viscoso.

- No regime inercial, a evolução segue uma lei tipo Ritter (1892), a saber:

$$x'_t \propto t' \quad ('): \text{indicando variável adimensional} \quad (2.9)$$

onde:

$$x'_t = \frac{x}{L} \quad \text{e} \quad t' = \frac{\rho g \cos(\alpha) H^3}{12 \mu L^2} t \quad (2.10)$$

- No primeiro regime viscoso, a lei de evolução resultou em:

$$x'_t = 0,969 t'^{0,5} \quad \text{se} \quad t' < 0,1 \quad (2.11)$$

Finalmente, no segundo regime viscoso, obteve-se um comportamento assintótico no tempo t :

$$x'_t = 1,860 t'^{0,2} - 0,962 \quad \text{se} \quad t' > 0,1 \quad (2.12)$$

- Posição inclinada

- Novamente o regime inercial segue a lei de Ritter (equação 2.9). Já o primeiro regime viscoso é governado por lei similar à equação (2.10) (posição horizontal), tendo coeficiente da ordem de 1, a saber:

$$x'_t = 1,071 t'^{0,5} \quad , \quad \text{se} \quad t' < 1,23 \quad (2.13)$$

- O segundo regime viscoso é dado por:

$$x'_t = 2,052 t'^{0,31} - 1, \quad \text{se} \quad t' > 1,23 \quad (2.14)$$

Para Nsom et. al. (2000), a comparação entre o estudo teórico e experimental foi bem sucedida e, em ambos os experimentos, tanto com o canal horizontal quanto inclinado, sob as mesmas condições, a mudança na lei de evolução da frente da onda pôde ser atribuída à inclinação do fundo do canal.

Debiane (2000) em seu trabalho de doutorado determina, sob forma de série de potências, leis de evolução da frente laminar de material visco-plástico (resina Carbopol 940) com base nas equações de águas rasas e para a condição de canal largo (plano infinito). Determina a solução do problema tanto para o regime predominantemente inercial quanto em regime viscoso, seja para reservatório infinito quanto limitado (finito).

A lei de evolução da frente (em variáveis adimensionais) é dada por:

- Regime inercial e reservatório “infinito”

$$\frac{x_f^*}{t^*} \approx 2 - \left(\frac{2+3m^*}{2+4m^*} \right) \chi_1(m^*) \left[(2+m^*)^{1/m^*} (1/Re)t^* \right]^{\frac{m^*}{2m^*+3}} + \left(\frac{2+3m^*}{2+4m^*} \right) \chi_2(m^*) \left[(2+m^*)^{1/m^*} (1/Re)t^* \right]^{\frac{2m^*}{2m^*+3}} \quad (2.15)$$

onde:

$$\chi_1(m^*) \approx \left(\frac{2m^*+3}{1+m^*} \right) \left[\frac{(m^*+1)(3m^*+1)2^{1/m^*}}{(4+7m^*)m^*} \right]^{\frac{m^*}{2+3m^*}} \quad (2.16)$$

$$\chi_2(m^*) \approx \frac{0,977}{m^{*0,314}} \quad (2.17)$$

$$Re = \frac{\rho H^n (\sqrt{gH})^{2-n}}{k} \quad (2.18)$$

$$(x_f^*, t^*) = \left(\frac{x}{H}, \frac{t}{\sqrt{H/g}} \right) \quad (2.19)$$

$$m^* = \frac{1}{n} \quad (2.20)$$

x_f^* : posição, adimensional, da frente da onda, a partir de $x=0$ (local da barragem);

t^* : tempo adimensional, a partir do instante da ruptura;

Re : número de Reynolds;

n : parâmetro do modelo reológico de Herschel-Bulkley (índice de escoamento);

H : profundidade inicial;

k : parâmetro do modelo reológico de Herschel-Bulkley (índice de consistência);

g : gravidade.

- Regime viscoso e reservatório infinitamente longo

$$\tilde{x}_f(\tilde{t}) = \tilde{c}_f(m^*) \left(\tilde{t} - \tilde{c}_1(m^*) \right)^{\frac{1}{m^*+1}} \quad (2.21)$$

onde

$$(\tilde{x}, \tilde{t}) \approx \left(\frac{x}{H}, \frac{t}{T} \right) \text{ com } T \approx (m^* + 2) \left(\frac{2(m^* + 1)}{m^*} \right)^{m^*} \left(\frac{k}{\rho g H} \right)^{m^*} \quad (2.22)$$

sendo $\tilde{c}_1(m^*) \cong 0$ para $(Re \ll 1)$ e $\tilde{c}_f(m^*)$ dada por:

$$\tilde{c}_f(m^*) \approx \frac{1}{3} + \frac{0,944}{(m^* + 0,548)^{0,85}} \quad \text{erro} < 0,4\% \quad (2.23)$$

$\tilde{x}_f$: posição da frente da onda a partir de $x=0$ (local da barragem);

$\tilde{t}$: tempo adimensional, a partir do instante da ruptura;

Re : número de Reynolds;



- n : parâmetro do modelo reológico de Herschel-Bulkley (índice de escoamento);
 H : profundidade inicial;
 k : parâmetro do modelo reológico de Herschel-Bulkley (índice de consistência);
 g : gravidade.

- Regime viscoso e reservatório limitado

$$\hat{x}_f(\hat{t}) = \hat{c}_f(m^*) \left[\hat{t} + \hat{c}_2(m^*) \right]^{\frac{1}{3m^*+2}} \quad \text{com} \quad \hat{c}_f(m^*) = \left[\frac{(3m^*+2) \left(\frac{2(m^*+1)^2}{m^*(2m^*+1)} \right)^{m^*}}{a(m^*)^{2m^*+1}} \right]^{\frac{1}{3m^*+2}} \quad (2.24)$$

onde

$$(\hat{x}, \hat{t}) \approx \left(\frac{x}{L}, \frac{t}{T} \right) \quad \text{com} \quad T \approx (m^*+2) \left(\frac{2(m^*+1)}{m^*} \right)^{m^*} \left(\frac{k}{\rho g H} \right)^{m^*} \left(\frac{L}{H} \right)^{m^*+1} \quad (2.25)$$

$$a(m^*) = \int_0^1 \left(1 - \eta^{\frac{1+m^*}{m^*}} \right)^{\frac{m^*}{2m^*+1}} d\eta \approx \frac{2}{3} + \frac{0,297}{m^*+0,705} \quad \text{erro} < 0,13\% \quad (2.26)$$

$\hat{x}_f$: posição da frente da onda a partir de $x = 0$ (local da barragem);

$\hat{t}$: tempo adimensional, a partir do instante da ruptura;

$\hat{c}_2(m^*)$: constante de integração;

Re : número de Reynolds;

n : parâmetro do modelo reológico de Herschel-Bulkley (índice de escoamento);

H : profundidade inicial;

k : parâmetro do modelo reológico de Herschel-Bulkley (índice de consistência);

g : gravidade.

Debiane (2000) conclui, em seu trabalho, que existem duas fases predominantes, uma primeira predominantemente inercial seguida de uma fase viscosa até a parada do escoamento. Os estudos experimentais realizados em canal horizontal de seção retangular mostraram-se consoantes com as previsões teóricas.

Com base no que foi exposto, o objetivo desta dissertação é realizar experiências, em laboratório, em condições transientes (onda gerada quando do



rompimento de uma estrutura retendo material de matriz argilosa) e utilizar uma nova aproximação teórica que leve em consideração as dissipações viscosas na determinação da velocidade de propagação da onda produzida.

Esta aproximação deverá ser validada através de experimentos com fluidos puramente viscosos (mistura água + açúcar, de reologia newtoniana) e fluido visco-plástico (água + argila caulinita, de reologia Herschel-Bulkley), caracterizados do ponto de vista reológico e escoando em pequenos canaletos de declividade variável, com os ensaios dinâmicos realizados apenas para misturas de água + argila caulinitica.



III MATERIAL E MÉTODO

3.1 - Conceitos Básicos

3.1.1 - Fluido

A concepção mais simples sobre a definição de fluido encontrada na literatura clássica é que “fluido é toda matéria que se deforma com a aplicação da mínima tensão de cisalhamento”. No entanto, quando se trata de fluidos denominados não-Newtonianos, cabe ressaltar que os mesmos têm tendências a suportar pequenas tensões de cisalhamento sem apresentar deformação alguma. Esta tensão, a qual o fluido (não-Newtoniano) pode resistir sem se deformar, é chamada tensão crítica de cisalhamento ou tensão de escoamento.

3.1.2 - Viscosidade

Quando um fluido sofre uma deformação ocorre uma interação interna entre as partículas, mas sabe-se que há diferentes comportamentos para essa interação em diferentes tipos de fluidos. Tomando-se como exemplo básico dois fluidos diferentes escoando num plano inclinado sob as mesmas condições, o tempo de queda provavelmente será diferente para os mesmos, dependendo da resistência interna da interação das partículas. Essa maior ou menor resistência interna das partículas está diretamente ligada à noção de viscosidade. Outra definição clássica sobre a noção de viscosidade, é dizer que a mesma é a variação da tensão pela variação da taxa de deformação, a qual se mantém constante, em um fluido Newtoniano.

Analisando, por exemplo, quatro escoamentos de fluidos diferentes (Figura 4a), nota-se que cada fluido requer maior tempo para escoar,

“Estudo Teórico-Experimental para a Determinação da Velocidade de Frentes de Lama Escoando em Canais”



respectivamente da esquerda para a direita. No entanto, o resultado final do tempo necessário para escoar dos três primeiros é de mesma ordem. Já, o quarto fluido, apresenta-se diferente dos demais. A explicação para esse fenômeno é a presença de uma tensão de cisalhamento crítica (τ_c) limitante para a deformação do fluido.

Em suma, uma maior ou menor viscosidade de um fluido não implica na condição de não-Newtoniedade, e sim na velocidade de deformação.

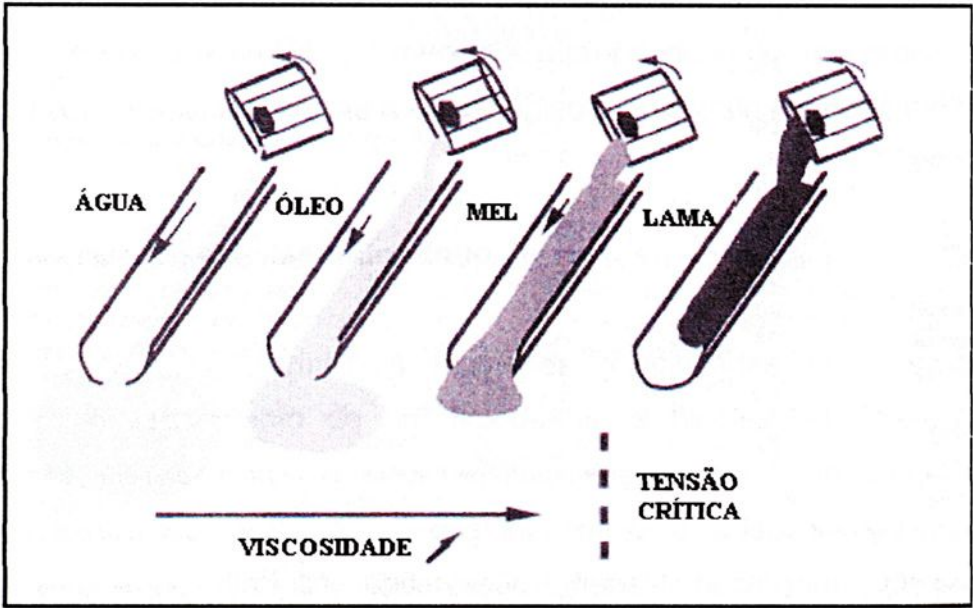


Figura 1a- Escoamento de água, óleo, mel e lama.
(Coussot, P – Mudflow Rheology and Dynamics)

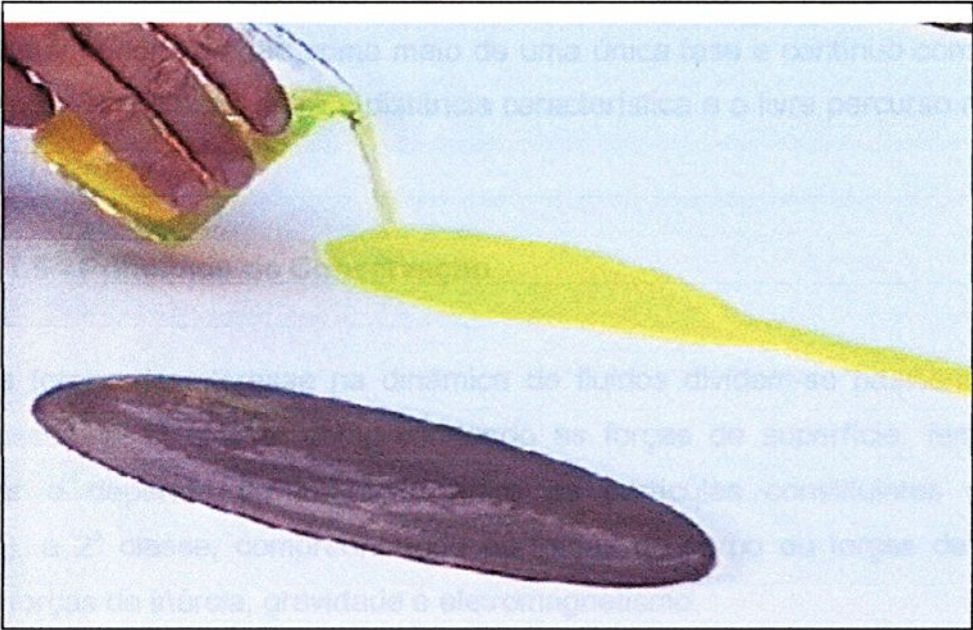


Figura 4b - Escoamento de lama (não-Newtoniana) e água com corante (Newtoniana).

3.1.3 - Tixotropia

O fenômeno de tixotropia consiste na redução da viscosidade aparente em função do tempo em suspensões submetidas a uma taxa (ou tensão) de cisalhamento constante. Este comportamento é freqüentemente observado em suspensões contendo aglomerados fracos de partículas, como aqueles responsáveis pelo aparecimento da pseudoplasticidade (Pandolfelli, 2000).

Segundo Nogueira (1988), tixotropia é a propriedade de uma argila amolgada recuperar parte da sua resistência ao cisalhamento no estado indeformado.

3.1.4 - Hipótese do Meio Contínuo

Talvez uma das principais hipóteses relacionadas com o tratamento matemático do escoamento de um fluido seja a hipótese do meio contínuo. Teoricamente, consideramos as características desse meio como sendo contínuas no tempo e espaço. Na prática, qualquer meio é descontínuo, no entanto, dependendo da escala de observação, faz-se necessário desprezar as características descontínuas do meio.

Para o caso específico de "mudflow" (lama), o mesmo terá seu comportamento considerado como meio de uma única fase e contínuo com número de **Knudsen** $\ll 1$ (razão entre a distância característica e o livre percurso médio de moléculas).

3.1.5 - Princípios de Conservação

As forças de interesse na dinâmica de fluidos dividem-se basicamente em duas classes: a 1ª classe, compreendendo as forças de superfície, tem origem molecular e depende da interação entre as partículas constituintes do meio (tensões); a 2ª classe, compreendendo as forças de corpo ou forças de volume, inclui as forças de inércia, gravidade e eletromagnetismo.



3.1.5.1 - Conservação da Massa

Num fluido real, a massa deve ser conservada, jamais criada ou destruída. Conforme já é conhecido da mecânica dos fluidos clássica, tem-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial X_i} = 0 \quad (3.1)$$

com $i = 1, 2, 3$

1º termo: variação temporal da massa específica do meio;

2º termo: variação da massa devido ao fluxo de matéria no espaço (divergência de ρU_i).

3.1.5.2 – Conservação da Quantidade de Movimento

Em um fluido, o balanço entre a aceleração e a somatória das forças atuantes (forças de corpo e superfície) é dado por:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = \rho F_i + \frac{\partial T_{ij}}{\partial X_j} \quad (3.2)$$

com $i = 1, 2, 3$ e $j = 1, 2, 3$

sendo:

F_i : forças de corpo;

T_{ij} : tensor de tensões;

U_i : vetor velocidade.

3.1.6 – Introdução às leis da Reologia

3.1.6.1 – Reometria

Reometria pode ser definida como o estudo das técnicas que possibilitem a medição das propriedades reológicas de um fluido.



É sabido que sob mesmas condições iniciais e de contorno as características de um escoamento dependem unicamente da composição do material (em escoamento). Este fato fez com que se desenvolvessem métodos empíricos (como por exemplo, o “slump test”) nos quais os materiais são submetidos a forças e movimentos e reagem de maneira diferente de acordo com sua composição. Essas diferentes reações eram usadas para comparar esses materiais. Essas são técnicas usualmente padronizadas em concreto fresco ou na indústria alimentícia, por exemplo. No entanto, no caso de escoamento de fluidos, esses métodos não nos dão informações relevantes, pois as condições desses escoamentos são complexas e estão longe de serem controláveis, assim os dados colhidos no teste (velocidade, altura da lâmina, etc.) retratam o comportamento do escoamento em um instante particular, sendo assim não confiáveis para a caracterização do fluido.

O objetivo da reometria é determinar as características do fluido a partir de medições feitas em escoamentos simples e controlados. Nestes testes o fluido é tensionado de maneira simples, de tal forma que poucas componentes do seu tensor de tensões são diferentes de zero. Assim, a partir das componentes da tensão cisalhante e da taxa de deformação, pode-se chegar a uma equação característica.

Na prática, a fim de se medir a viscosidade de um fluido, este deve ser confinado entre alguns dispositivos, com condições de borda fixas e determinadas (dentro de um tubo, entre placas paralelas, entre cilindros concêntricos, etc.). Esses aparelhos são definidos como reômetros.

A escolha da geometria mais apropriada para materiais complexos, como lama, é um ponto extremamente importante. Na prática, para qualquer fluido, é muito difícil encontrar a geometria que nos forneça uma taxa de deformação perfeitamente homogênea entre as placas (cones, cilindros, discos). Então, na maioria dos casos, têm-se uma taxa de deformação heterogênea e os dados reométricos convencionais nos mostram apenas as características médias do escoamento (torque, velocidade de rotação, pressão) nas bordas. Nesses casos são necessários alguns cálculos para a obtenção dos dados de tensão de cisalhamento x taxa de deformação a partir dos valores de torque x velocidade de rotação. Os métodos de cálculo são diferentes para cada geometria.



3.1.6.2 - Modelos Reológicos

A seguir são apresentados alguns modelos matemáticos que representam diferentes tipos de comportamentos reológicos. Esses modelos são válidos para escoamentos simples (fluxos com superfície livre) e expressam a relação $\tau(\dot{\gamma})$ (tensão cisalhante em função da taxa de deformação).

O modelo mais simples que se tem é o do fluido newtoniano em que a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação. A constante de proporcionalidade é a viscosidade do fluido. Matematicamente, tem-se:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (3.3)$$

Este tipo de comportamento é observado com o ar, água, óleos, álcoois, etc. Um modelo um pouco mais complexo é o modelo “potência” (Oswald, 1925):

$$\tau = a \dot{\gamma}^n \Rightarrow \mu = a \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3.4)$$

onde a e n são parâmetros do fluido.

Para alguns fluidos, para taxas de deformação próximas a zero ou valores infinitos, o valor μ tende a um valor constante (μ_0 e μ_∞ respectivamente). Neste caso o modelo mais recomendado é:

$$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = f(\dot{\gamma}) \quad (3.5)$$

onde $\mu_0 > \mu_\infty$ e f é uma função decrescente de $\dot{\gamma}$ que tem que ser escolhida de tal forma que $f(\dot{\gamma}) \rightarrow 1$ quando $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ e $f(\dot{\gamma}) \rightarrow 0$ quando $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$. Powell-Eyring, Carreau e Ellis são exemplos desse modelo.

No caso de fluidos não-Newtonianos (com presença de tensão crítica), os modelos são da forma:

$$\tau = \tau_c + f(\dot{\gamma}) \quad (3.6)$$

Alguns exemplos importantes são:

$$\tau = \tau_c + \mu_B \dot{\gamma} \quad (\text{Bingham e Green – 1920}) \quad (3.7)$$

$$\tau = \tau_c + k_m \dot{\gamma}^m \quad (\text{Herschel e Bulkley – 1926}) \quad (3.8)$$

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{K} \dot{\gamma} \quad (\text{Casson – 1959}) \quad (3.9)$$

Em cada caso, os parâmetros τ_c (tensão crítica), μ_B (viscosidade plástica), k_m (índice de consistência) e m (índice de escoamento) são diferentes e devem ser determinados experimentalmente. Esses modelos são aplicáveis, por exemplo, a concreto fresco, lamas, tintas, misturas hiperconcentradas, etc.

A Figura 5 ilustra alguns dos diferentes tipos de modelos reológicos encontrados na literatura.

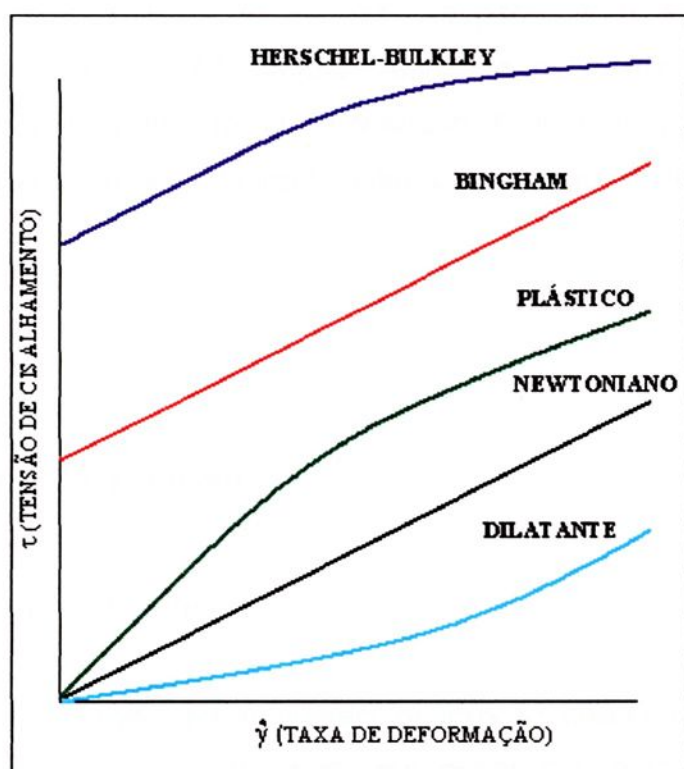


Figura 2 - Reograma de diferentes fluidos.

3.1.6.3 - Estratégias de Medição

A partir da definição de um modelo reológico, e em posse dos dados experimentais, ter-se-ia que definir qual o método a ser utilizado para uma calibração precisa dos parâmetros do modelo em questão.

Para o modelo de Herschel-Bulkley proposto, uma opção seria plotar $(\tau - \tau_c) \times \dot{\gamma}$ em escala log-log para diferentes tentativas de valores de τ_c até que se conseguisse traçar uma curva satisfatória a partir dos pontos obtidos experimentalmente. A posição e curvatura desta curva característica nos forneceriam os valores de k_m e m (parâmetros de Herschel-Bulkley).

Nos casos aqui tratados, não haveria a necessidade de se buscar a curva que mais se adaptasse aos dados experimentais, pois o software Rheo2000 usado com o Reômetro fornece a calibração afinada dos parâmetros de Herschel-Bulkley, assim como as curvas características de escoamento para cada material ensaiado. O Reômetro utilizado é o R/S Rheometer, fabricado pela “Brookfield Engineering Laboratories” que controla tensão ou deformação. A geometria escolhida é do tipo que utiliza cilindros coaxiais, equipado com controlador de temperatura (banho térmico).

3.2 - Material

3.2.1 - Aparato experimental

3.2.1.1 - Canaletes

Os canaletes utilizados foram confeccionados em chapa de acrílico de 10 mm de espessura. Essa espessura foi a mínima necessária para se evitar qualquer deformação na estrutura do canaleta que viesse interferir nos resultados.

As dimensões dos referidos canaletes são:



Canalete 1 - $L = 1910 \text{ mm}$; $I = 320 \text{ mm}$; $h = 150 \text{ mm}$; $50 \text{ mm} \leq h_0 \leq 100 \text{ mm}$;
 $L_R = 300 \text{ mm}$.

Canalete 2 - $L = 1910 \text{ mm}$; $I = 320 \text{ mm}$; $h = 150 \text{ mm}$; $50 \text{ mm} \leq h_0 \leq 100 \text{ mm}$;
 $L_R = 600 \text{ mm}$ (dimensões iguais ao **Canalete 1**, diferenciando apenas na extensão do reservatório L_R).

onde:

L : comprimento total do canaleta;

h : altura total do canaleta;

h_0 : altura inicial de material no reservatório;

L_R : comprimento do reservatório.

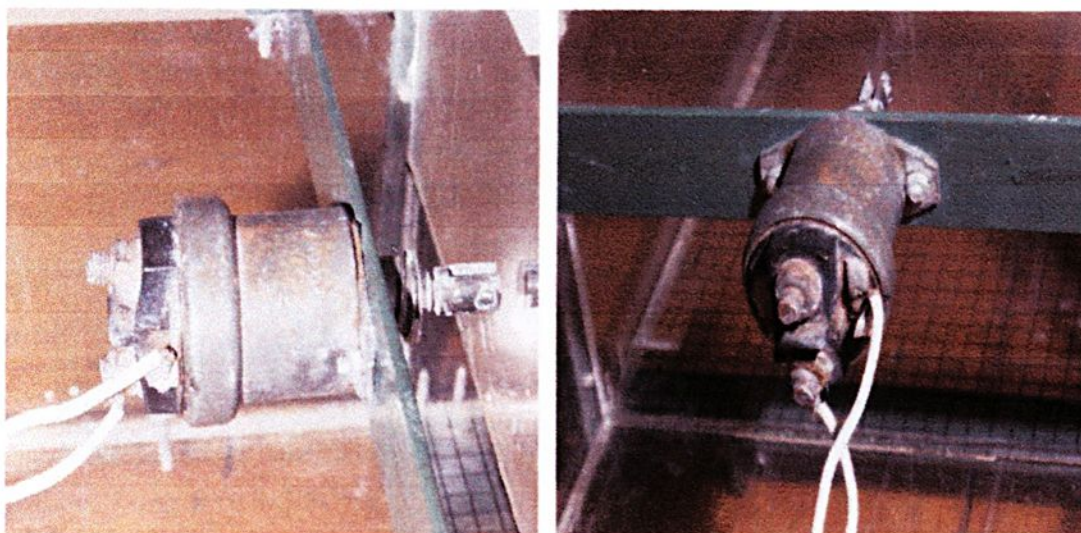
Os canaletes 1 e 2 são ilustrados na Figura (6):



Figura 3 - Canaleta 1 e 2.

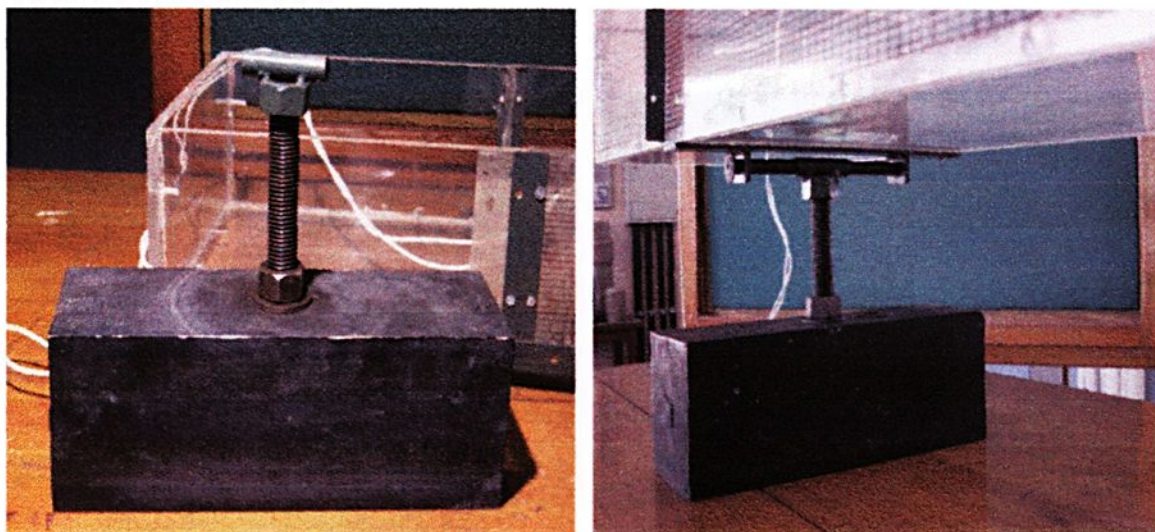
3.2.1.2 - Solenóide

Como o presente estudo trata de um problema tipo ruptura de barragem, optou-se por utilizar um solenóide, conforme Figura 7, para fazer o acionamento automático da comporta, o que garantiria uma condição de “ruptura instantânea”.

**Figura 4 - Solenóide.**

3.2.1.3 - Dispositivos de ajuste de inclinação do canaleta

Para se variar à inclinação dos canaletes, confeccionou-se uma base em madeira com um sistema de rosca sem fim sob o local da barragem (Figura 8a), e uma outra base também em madeira a jusante da barragem para se poder garantir que houvesse horizontalidade dos canaletes (Figura 8b).

**Figura 5a - Dispositivo utilizado para dar a inclinação do fundo do canaleta.**

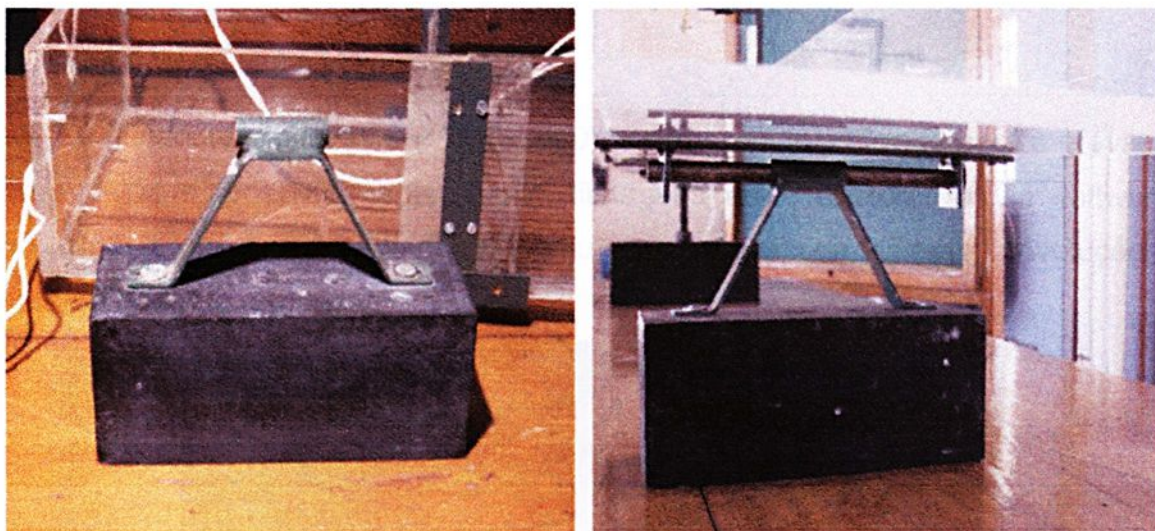


Figura 8b - Dispositivo que permite variar a inclinação do fundo do canaleta, a jusante da barragem.

3.2.1.4 - Bomba e tanque de preparo das misturas

Para o preparo das misturas de água + argila caulínica, utilizou-se um tanque com capacidade de aproximadamente 100 litros, e para a colocação das mesmas dentro do reservatório dos canaletes, optou-se pela utilização de uma bomba centrífuga com motor de indução monofásico de 1,0 cv e 3520 rpm, como apresentado na Figura 9.

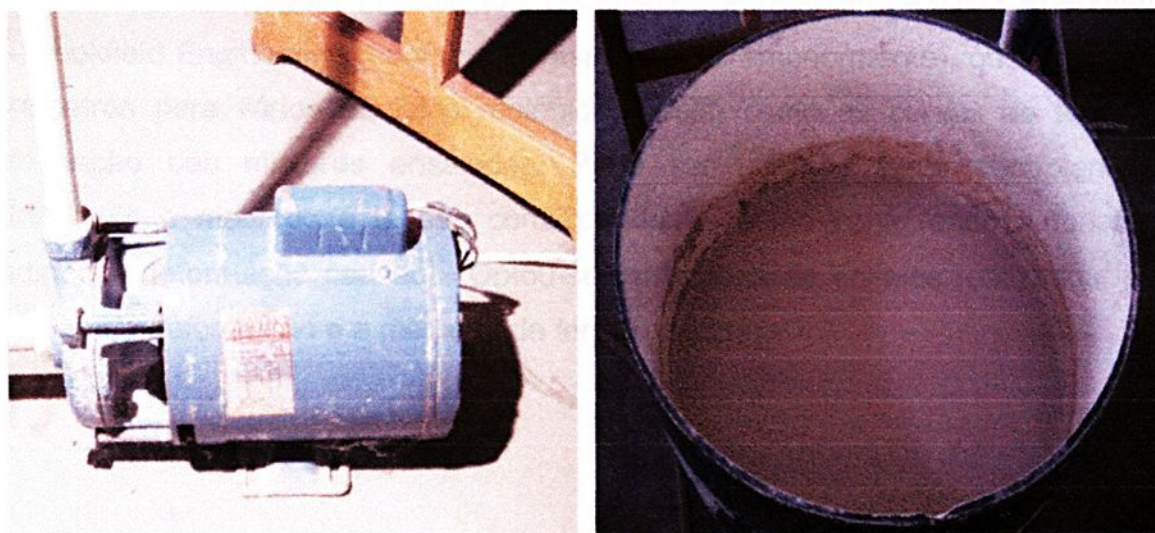


Figura 6 - Bomba e o reservatório onde se preparou a mistura água + argila caulínica.

3.2.1.5 - Filmadora

A filmadora digital JVC (GY DV 500) (Figura 10), foi utilizada para a gravação dos ensaios e, posteriormente, essas filmagens eram capturadas via softwares DVTools e Adobe Premiere, o que permitiu acompanhar, com detalhe, a evolução da frente da onda de ruptura.



Figura 7 - Filmadora digital utilizada nas filmagens dos ensaios de ruptura de barragem.

3.2.1.6 - Reômetro

O reômetro (Figura 11) utilizado nos ensaios de reometria é o R/S Rheometer, da Brookfield Engineering (conforme já especificado anteriormente), que fornece os parâmetros para vários modelos reológicos assim como as curvas de tensão x deformação das misturas ensaiadas. Pode ser utilizado tanto controlando a deformação e medindo a tensão correspondente, como controlando a tensão e medindo a deformação causada. Optou-se, na bateria de ensaios realizados, pela variação da deformação e a medição da tensão causada.

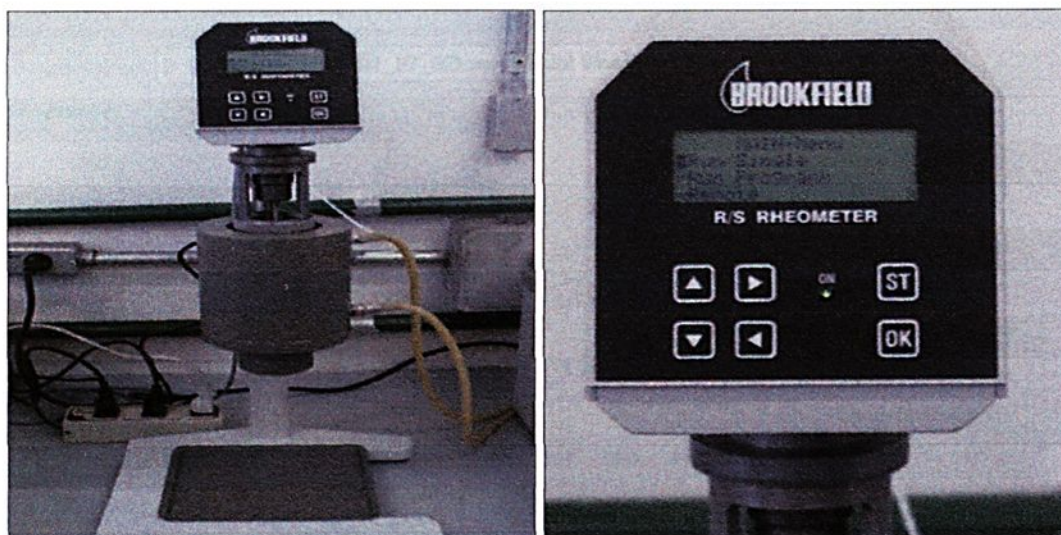


Figura 8 - Reômetro R/S de cilindros coaxiais utilizado nos ensaios de caracterização reológica.

3.2.1.7 - Calibração do reômetro

Os resultados aqui relatados foram apontados por Lledo dos Santos (2003) em sua dissertação de mestrado.

Os ensaios foram realizados no reômetro utilizando a técnica de variação da taxa de deformação e medição das tensões correspondentes.

Nessa fase surgiu a necessidade de verificar a confiabilidade do aparelho, para isso, ensaiou-se uma mistura de água + açúcar com concentração de 60% (em massa) à temperatura de 10°C. Segundo o *Manual de Engenharia Química - UFRJ, quinta edição*, sob essas condições, essa mistura (Newtoniana) apresenta viscosidade de 113,9 cP (0,1139 Pa.s). Pela Figura 12, observou-se que a viscosidade obtida no ensaio foi de aproximadamente 0,11 Pa.s, com um coeficiente de correlação (B) de 0,99 para o modelo Newtoniano, o que assegura a precisão na calibragem do reômetro.

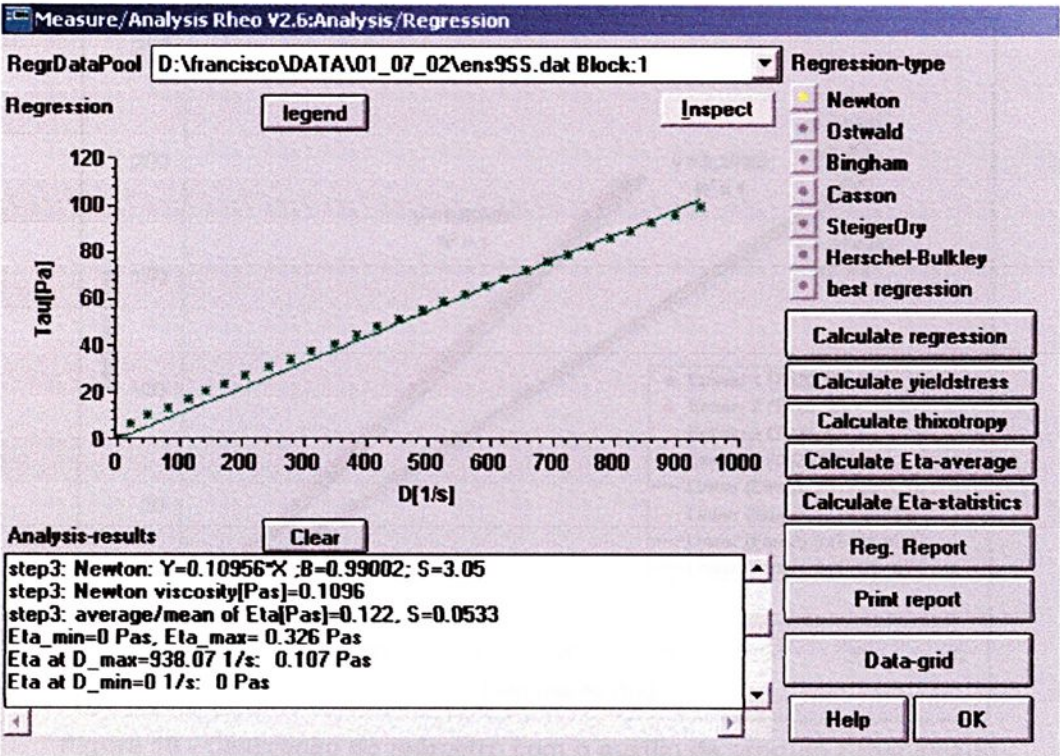


Figura 9 - Teste de calibração do reômetro – mistura água + açúcar com $C_m = 60\%$.

De maneira análoga, procedeu-se a segunda calibração, a partir do produto CANNON CERTIFIED VISCOSITY STANDARD fornecido pela empresa de reometria, apresentando as seguintes características (Quadro 1):

Quadro 1 - Valores da viscosidade em função da temperatura para fluido padrão

Temperatura (°C)	Viscosidade (Pa.s)
20	8,31
25	5,24



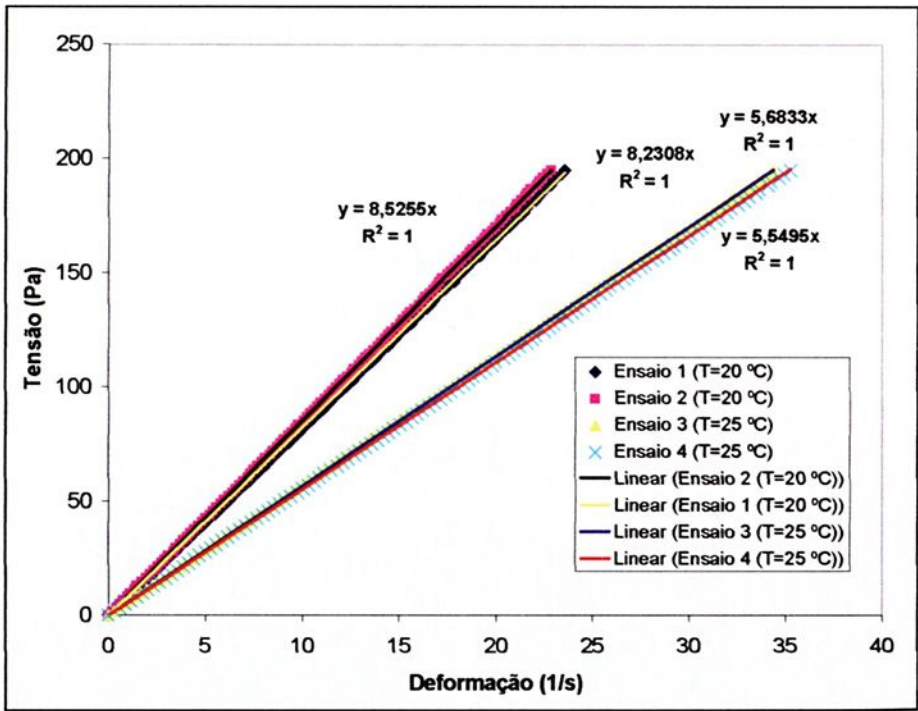


Figura 10 - Calibração do reômetro com o auxílio de produto especificado.

Curvas resultantes do ensaio de reometria são mostradas na Figura 13 e, com o auxílio da aproximação das linhas de tendência, as viscosidades (representadas pela declividade das retas) forneceram os seguintes resultados (Quadro 2):

Quadro 2 - Valores da viscosidade em função da temperatura

Ensaio	Temperatura (°C)	Viscosidade (Pa.s)
1	20	8,52
2	20	8,23
3	25	5,68
4	25	5,55

Apesar da pequena diferença entre os valores das viscosidades apresentadas no Quadro 1 e 2, verificou-se boa aproximação das viscosidades em questão. Essa pequena diferença é explicada pela variação da temperatura da amostra durante o ensaio, “variação” essa que será comentada no item 3.2.1.9.



3.2.1.8 - “Spindles”

“Spindles” são acessórios com os quais se realizam os testes de cisalhamento (Figura 14). A escolha dos “spindles” é feita de acordo com a faixa de viscosidade na qual o acessório pode trabalhar, ou seja, escolhe-se o dispositivo cuja faixa abranja a viscosidade aproximada do material a ser ensaiado.

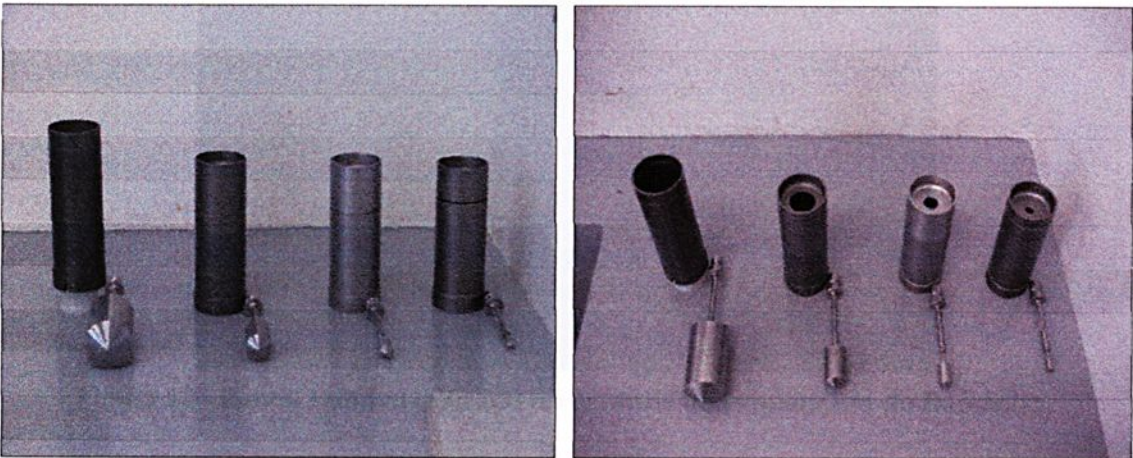


Figura 11 - “Spindles” utilizados nos ensaios de reometria.

Quadro 3 - Sistema de medição x “Spindles”

Sistema de medição	“Spindles”				
	CC48	CC45	CC25	CC14	CC08
Variação da taxa de deformação (s ⁻¹)	0 – 4114	0 – 1032	0 – 1032	0 – 1032	0 – 1032
Variação da tensão de cisalhamento (Pa)	0 – 206	0 – 195	0 – 1141	0 – 6501	0 – 34844
Variação de viscosidade (cP)	0,005 – 32	0,020 – 15	0,118 – 100	0,672 – 500	3,60 – 3000
Volume da Amostra (ml)	70	100	17	3	0,5

Se forem utilizados dois “Spindles” diferentes, que possuam uma faixa de viscosidade aparente em comum, as curvas de *tensão x deformação* devem ser semelhantes.



3.2.1.9 - Banho térmico

O controle de temperatura é feito com o auxílio do banho térmico (Figura 15), isso é possível devido ao sistema de circulação ligado ao Reômetro.

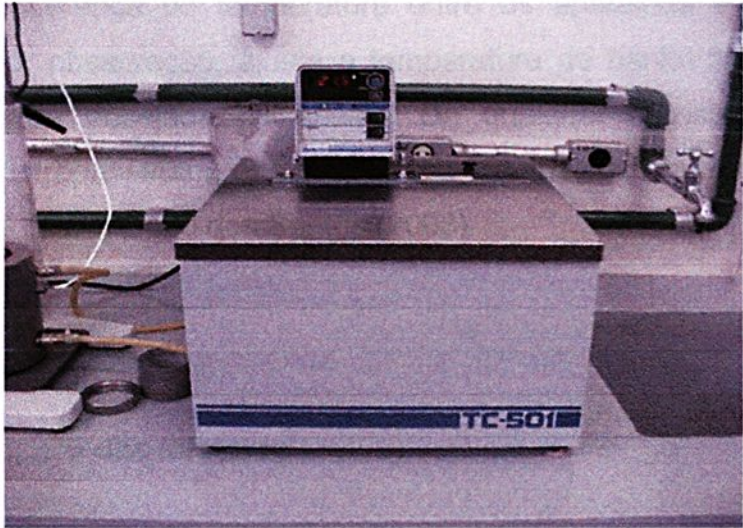


Figura 12 - Banho térmico utilizado no controle de temperatura do Reômetro.

Dependendo da faixa de temperatura na qual se deseja realizar o ensaio, deve-se utilizar um tipo de fluido de controle de temperatura no banho térmico. Os fluidos utilizados e as faixas de temperatura correspondentes são apresentados no Quadro 04.

Quadro 4 - Faixas de temperaturas de operação segundo o fluido de controle

Fluido	Faixa normal de utilização (°C)	Faixa extrema de utilização (°C)
Água	10 – 90	02 – 100
Etileno glicol 30%, água 70%	00 – 95	-15 – 107
Etileno glicol 50%, água 50%	-20 – 100	-35 – 115
Etileno glicol	50 – 125	25 – 155
Dynalene – HC 50™	-50 – 60	-62 – 60
DC5 10 50 cs óleo de silicone	50 – 150	05 – 270
DC 550 125 cs óleo de silicone	100 – 200	80 – 315

A temperatura do fluido circulante é medida no próprio banho térmico e ao mesmo tempo um sensor, no Reômetro, monitora a temperatura da amostra durante todo o ensaio. Pode-se observar diferenciação entre as temperaturas definidas no

banho térmico e as medidas no Reômetro. Isso ocorre devido a perdas na transferência de calor do fluido de manutenção do banho térmico para o Reômetro. Assim, para operações de resfriamento a temperatura do banho térmico é mais baixa que a medida no Reômetro e para operações de aquecimento é observado o contrário. Essa diferença de temperatura entre os aparelhos é controlada pelo operador que, por observação, ajusta a temperatura do banho térmico de acordo com a temperatura desejada no ensaio. De qualquer maneira, as diferenças observadas não ultrapassaram, nas campanhas de ensaios realizadas, um valor da ordem de 5%, conforme Lledo dos Santos (2003).

3.3 - Métodos

3.3.1 - Preparo das misturas

- **Água + Argila Caulinítica**

Conforme Lledo dos Santos (2003), para se preparar as misturas nas concentrações desejadas é preciso, antes, realizar alguns ensaios de caracterização da argila caulinítica, quais sejam:

- granulometria e massa específica dos sólidos;

A mistura utilizada foi a de água + argila caulinitica não expansiva em diferentes concentrações em volume ($5\% < C_v < 20\%$).

Com o auxílio das informações obtidas com o fornecedor da argila controlada, pode-se verificar uma absorção da ordem de 9% a 10%. Quando do cálculo da concentração em volume, em todos os casos, não se considerou essa água como parte da argila (conduta também adotada por alguns autores). A quantidade de água determinada não leva em conta a perda por absorção, ou seja, não se considera apenas a água livre.

Na determinação das porcentagens de solo e água para a preparação das respectivas misturas foi utilizado o seguinte critério: considerando um volume de



mistura constante igual à “V” e uma porcentagem de solo seco (concentração em volume) $C_v = \%S$, foi determinada a porcentagem de água da mistura $\%W$ tal como:

$$\%W = 100 - \%S \quad (3.10)$$

sendo

$\%W$: porcentagem de água que a mistura deve conter para satisfazer a condição (imposta) de C_v ;

$\%S$: porcentagem de solo seco (concentração em volume).

$$\%S = C_v = \frac{V_{solo}}{V_{\text{água}} + V_{solo}} \quad (3.11)$$

Os volumes de materiais são determinados a partir do volume “V” inicialmente previsto da seguinte forma:

$$V_{solo} = \%S \times V/100 \quad (3.12)$$

$$V_{\text{água}} = \%W \times V/100 \quad (3.13)$$

sendo

V_{solo} : volume de solo seco que a mistura deve conter;

$V_{\text{água}}$: volume de água que a mistura deve conter.

Trabalhando com a massa, tem-se:

$$M_d = \rho_s \times V_{solo} \quad (3.14)$$

sendo

M_d : massa de solo seco;

ρ_s : massa específica dos grãos.

No entanto, deve-se deduzir que a massa de solo leva uma quantidade de água. Portanto, na preparação das misturas, a massa de solo ‘in natura’ a ser pesada na balança deve levar em consideração a umidade desse solo. Para o cálculo da massa de solo a ser pesada (M_p), considerando que a amostra tenha uma umidade de $\%w$ (conhecida), tem-se:

$$M_p = (1 + \%w) \times M_d \quad (3.15)$$



Dessa forma, a massa de água ($M_{\text{água}}$) a ser adicionada ao solo é calculada com:

$$M_{\text{água}} = (\rho_w \times V_{\text{água}}) - (\%w \times M_p)$$
 (3.16)

sendo

$M_{\text{água}}$: massa de água a ser adicionada ao solo para preparo da mistura;

ρ_w : massa específica da água;

$\%w$: teor de umidade.

Com base nesses cálculos elaborou-se uma planilha para determinação das massas de água e solo (a serem pesadas) para a preparação de misturas genéricas. É dado de entrada o volume requerido de amostra, a concentração desejada, a umidade do solo e massa específica do solo e da água.

Um exemplo de preenchimento desta planilha é mostrado na Figura 16.

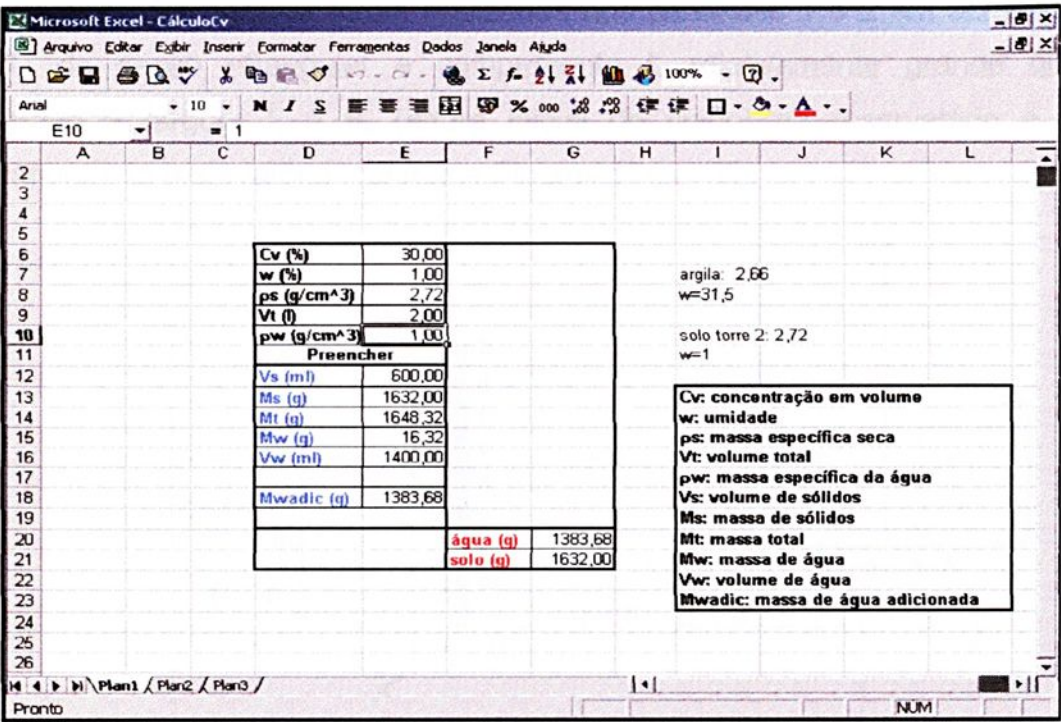


Figura 13 - Planilha para cálculo das massas a serem utilizadas na preparação de misturas.

3.3.2 - Procedimento experimental para os ensaios de ruptura

O material ensaiado é constituído por misturas sólido + líquido a partir de amostras realizadas no laboratório, a saber: mistura água + argila caulínica em diferentes concentrações em volume (C_v) com $5\% < C_v < 20\%$. O material ensaiado foi controlado em termos de qualidade da água (pH), cujos resultados são apresentados em 5.1. Além disso, foram controlados os efeitos de certos parâmetros adicionais tais como influência da concentração em volume (item 5.2), análise da ocorrência de tixotropia (item 5.4), da temperatura sobre o reograma tensão de cisalhamento x taxa de deformação (item 5.5), e do modo de preparação da amostra (item 5.6). No que se referem aos parâmetros tais como massa específica, viscosidade da mistura e tensão crítica τ_c do modelo Herschel-Bulkley, estes foram determinados através de ensaios específicos, notadamente os de reometria.

Concomitantemente com o ensaio de reometria, realizaram-se experiências de ruptura de barragem com a mistura água + argila caulínica (fluido de natureza visco-plástica). Os ensaios foram realizados nos canaletes 1 e 2 em acrílico (item 3.2.1.1) de seção retangular e comprimento L relativamente grande quando comparado à largura I , à h_0 (altura inicial do fluido) no reservatório e L_R o comprimento do reservatório, conforme Figuras 17a e 17b.

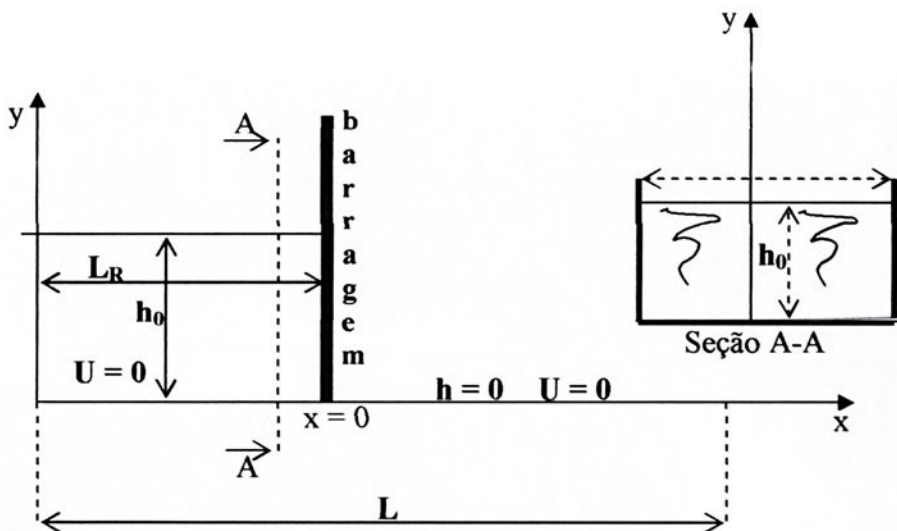


Figura 17a - Colocação do problema para $t = 0$ e canal.
 U é o campo de velocidade em x



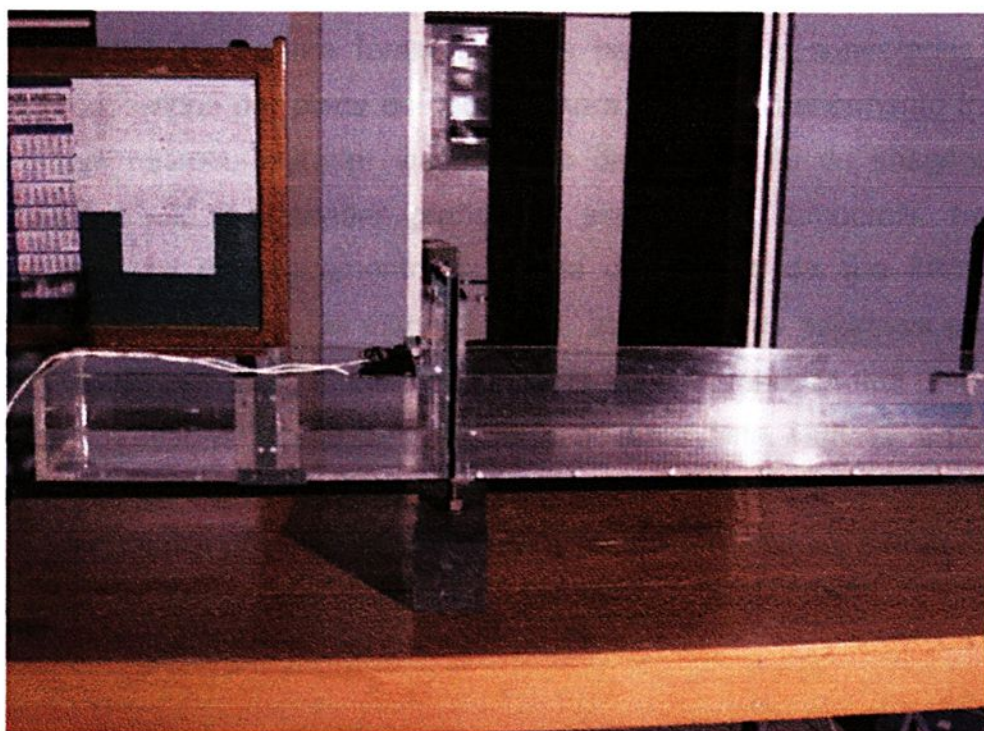


Figura 17b - Foto do canaleta 2, utilizado nos ensaios de ruptura de barragem.

Tanto no canaleta 1 como no 2, foram ensaiadas as misturas de água + argila caulínica (fluido de natureza visco-plástica) com concentrações na faixa de $5\% < C_v < 20\%$ para o canaleta 1 e, $5\% < C_v < 15\%$ para o canaleta 2, conforme o procedimento que se segue:

- Uma câmera de vídeo foi disposta na lateral dos canaletes conforme apresentado na Figura 18.

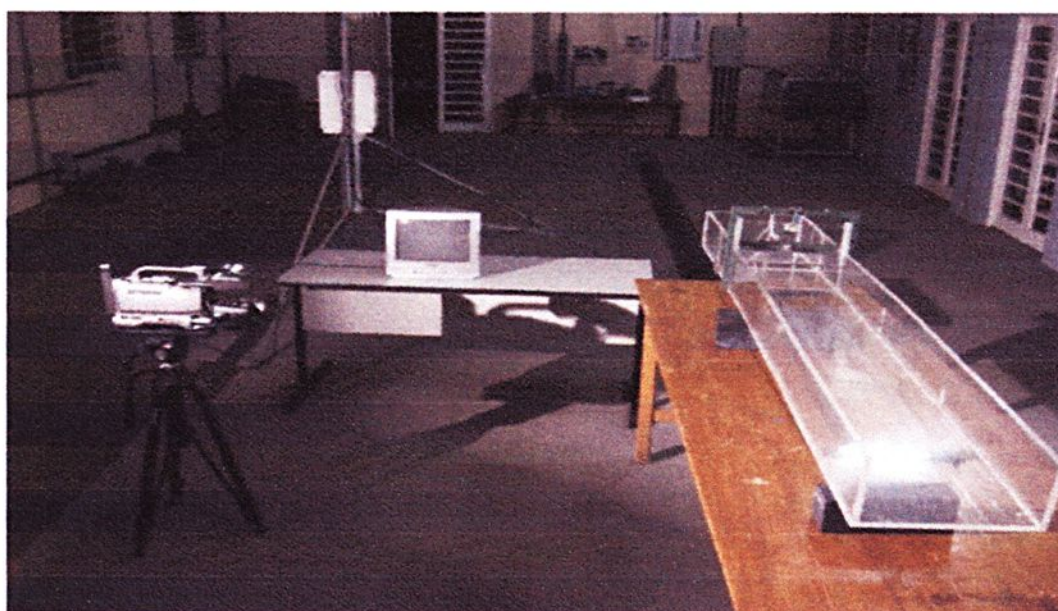


Figura 18 - Aparato experimental para filmagem de ensaio de ruptura.

Os ensaios de ruptura foram filmados pela câmera, controlados por um monitor e recuperados por placa de captura, para serem posteriormente tratados e analisados em microcomputador via software de tratamento de imagens. Desta análise, puderam-se depreender grandezas espaciais e temporais, tais como profundidade inicial do escoamento h_0 , forma da onda e de sua frente, e sua velocidade de propagação. De maneira geral, as grandezas espaciais podem ser obtidas em número de pixel, e antes de convertê-las em grandeza real (milímetro ou metro), uma correção óptica do campo filmado deve ser feita, segundo a posição de tomada da câmera de vídeo (filmadora). Procurou-se manter a ortogonalidade do sistema e tomou-se a distância diretamente a partir da malha na parede lateral do canal.



IV ABORDAGEM TEÓRICA PARA A DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DA FRENTE DE MATERIAL VISCOSO E VISCO-PLÁSTICO (LAMA)

4.1 – Proposta de modelagem

Com base na Figura 19 e nas considerações que:

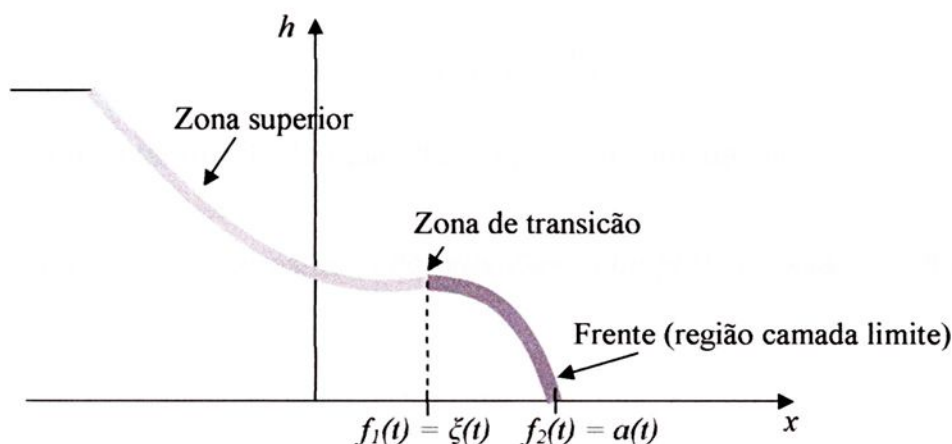


Figura 19 - Evolução da frente de onda

- a frente de onda está localizada em $x = f_2(t) = a(t)$;
- o ponto $x = f_1(t) = \xi(t)$ separa duas regiões, quais sejam, uma região sem efeito de resistência ($x < f_1(t)$) – zona superior - e uma com resistência ($f_1(t) < x < f_2(t)$) - região de camada limite ;
- o comprimento do efeito da camada limite é dado por $|a(t) - \xi(t)|$;
- a velocidade da partícula durante o escoamento e a profundidade local em $x = \xi(t)$ são dadas respectivamente por U e H .
- na região de camada limite a velocidade é dada por $U = U(t)$.

A velocidade do fluido em $x = \xi(t)$ é dada por $\left(U - \frac{\partial \xi}{\partial t}\right)$, no referencial móvel de velocidade U .

Sendo M a massa total por unidade de largura na região da camada limite (região da frente de onda), tem-se:

$$\frac{dM}{dt} = \rho H \left(U - \frac{d\xi}{dt} \right) \quad (4.1)$$

ρ : massa específica da mistura.

Se P é a quantidade de movimento total da massa de fluido na frente de onda, tem-se então:

$$\frac{dP}{dt} = \rho U H \left(U - \frac{d\xi}{dt} \right) + F \quad (4.2)$$

F : Força horizontal resultante aplicada à região da camada limite.

Supondo distribuição hidrostática de pressões, a força de pressão resultante é dada por:

$$\frac{1}{2} \rho g H^2 \quad (4.3)$$

Já a força total devido ao atrito, para escoamentos de natureza turbulenta, (segundo os trabalhos de Whitham (1954)), é dada por:

$$F_f = \int_{\xi}^a \rho K u^2 \cdot dx \quad (\text{de natureza turbulenta}) \quad (4.4)$$

o que implica que (4.2) se reescreve como sendo:

$$\frac{dP}{dt} = \rho U H \left(U - \frac{d\xi}{dt} \right) + \frac{1}{2} \rho g H^2 - \int_{\xi}^a \rho K u^2 \cdot dx \quad (4.5)$$

Entretanto, no estudo de caso tratado, a força de atrito (ou resistência viscosa) depende, e em muito, da lei de comportamento do fluido, a saber:



- Para fluidos viscosos Newtonianos $\tau = \mu \dot{\gamma}$; e para os não-Newtonianos (visco-plásticos), tem-se $\tau = \tau_c + k_m \dot{\gamma}^m$.

onde:

τ : tensão de atrito;

τ_c : tensão crítica;

$\dot{\gamma}$: taxa de deformação;

m : índice de escoamento;

k_m : índice de consistência.

Nos casos de fluidos hiperconcentrados, espera-se uma dependência da resistência com a velocidade na potência 1 da velocidade (u^1), diferente do regime turbulento (u^2).

4.2 - Estudo de caso particular:

Visando uma simplificação do estudo teórico a ser empreendido para fluido com comportamento Herschel-Bulkley (água + argila caulinítica), opta-se, neste primeiro momento, pela determinação da expressão da velocidade da frente de onda para um fluido com comportamento reológico **tipo potência**, a saber:

$$\tau = k_m \dot{\gamma}^m \quad (4.6)$$

Neste caso a força de resistência viscosa F_f é dada por:

$$F_f = \int_{\xi}^a k_m \left(\frac{u}{h} \right)^m \cdot dx \quad (4.7)$$

Adotando o mesmo procedimento que Whitham (1954), decorre que:

$$\frac{dP}{dt} = \rho U H \left(U - \frac{d\xi}{dt} \right) + \frac{1}{2} \rho g H^2 - \int_{\xi}^a k_m \left(\frac{u}{h} \right)^m \cdot dx \quad (4.8)$$

Uma vez que o escoamento é contínuo em $x = \xi(t)$, as expressões de $u = U(t)$ e $h = H$ da solução de Ritter (1892) podem ser obtidas quando se substitui x por $\xi(t)$. Assim exposto, tem-se:

$$\xi = \sqrt{gh_0} \left(\frac{3U}{2\sqrt{gh_0}} - 1 \right) t \quad (4.9)$$

$$H = h_0 \left(1 - \frac{U}{2\sqrt{gh_0}} \right)^2 \quad (4.10)$$

O que leva (4.1) a:

$$\frac{dM}{dt} = \rho h_0 \sqrt{gh_0} \left(1 - \frac{U}{2\sqrt{gh_0}} \right)^2 \left(1 - \frac{U}{2\sqrt{gh_0}} - \frac{3t}{2\sqrt{gh_0}} \frac{dU}{dt} \right) \quad (4.11)$$

que depois de integrada resulta em:

$$M = \rho h_0 \sqrt{gh_0} \left(1 - \frac{U}{2\sqrt{gh_0}} \right)^3 t \quad (4.12)$$

As equações (4.9), (4.10) e (4.12) devem satisfazer à equação (4.8). Nesta etapa, introduzindo a velocidade da frente de onda, tem-se:

$$u = U(t) \longrightarrow P(t) = M(t)U(t) \quad (4.13)$$

Com base em (4.1), a equação (4.8) se reescreve sob a forma:

$$\frac{dP}{dt} = M \frac{dU}{dt} + U \frac{dM}{dt} = \frac{1}{2} \rho g H^2 - k_m \left(\frac{U}{H} \right)^m (a - \xi) \quad (4.14)$$

Uma vez que a velocidade de frente de onda é $\frac{da}{dt} = U$ e introduzindo as equações (4.9), (4.10) e (4.12) em (4.14), obtém-se, após algumas manipulações algébricas:

$$\left(1 - \frac{\dot{a}}{2\sqrt{gh_0}}\right)^3 \frac{t\ddot{a}}{\sqrt{gh_0}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\dot{a}}{2\sqrt{gh_0}}\right)^4 - \frac{k_m \dot{a}^m}{\rho gh_0^{m+2} \left(1 - \frac{\dot{a}}{2\sqrt{gh_0}}\right)^{2m}} \left[a + \sqrt{gh_0} \left(1 - \frac{3\dot{a}}{2\sqrt{gh_0}}\right) t \right] \quad (4.15)$$

Para um fluido “desprovido de viscosidade” (ideal ou invíscido), ou seja, $k_m = 0$, a equação (4.15) torna-se:

$$\frac{t\ddot{a}}{\sqrt{gh_0}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\dot{a}}{2\sqrt{gh_0}}\right) \quad (4.16)$$

Pela resolução da equação (4.16), recupera-se a solução fundamental de Ritter (1892), ou seja:

$$a = 2(\sqrt{gh_0})t \quad (4.17)$$

o que implicaria em $u = 2\sqrt{gh_0}$.

Mas, para um fluido com viscosidade $k_m \neq 0$, o tratamento matemático foi realizado utilizando variáveis adimensionais, quais sejam:

$$A = (2t\sqrt{gh_0} - a)K_1 \quad (4.18)$$

$$T = K_2 t \quad (4.19)$$

sendo

$$K_1 = \frac{k_m}{\rho h_0^{m+1} (gh_0)^{\frac{2-m}{2}}} \quad (4.20)$$

$$K_2 = \frac{k_m}{\rho h_0^{m+1} (gh_0)^{\frac{1-m}{2}}} \quad (4.21)$$

Introduzindo as equações (4.18) e (4.19) em (4.15), obtém-se:

$$4(\dot{A})^{2m+3} \ddot{A}T + (\dot{A})^{2m+4} = (2)^{2m+4} (2 - \dot{A})^m (3\dot{A}T - 2A) \quad (4.22)$$

e fazendo algumas mudanças de variáveis, tais como:

$$T = f'(p) \text{ e } \dot{A} = \frac{dA}{dT} = p \quad (4.23)$$

com

$$A = A(T) \text{ e } T = T(A(p)) \quad (4.24)$$

tem-se:

$$f''(p) = T'(p) = \frac{dT}{dp} \quad (4.25)$$

Daí,

$$\begin{aligned} T'(p) &= \frac{dT}{dA} \frac{dA}{dp} = \frac{1}{\dot{A}} \frac{dA}{dp} \\ \frac{1}{\dot{A}} \frac{dA}{dp} &= f''(p) \Rightarrow \frac{1}{p} \frac{dA}{dp} = f''(p) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Integrando ambos os membros da equação acima, tem-se:

$$\int dA = \int pf''(p) dp \Rightarrow A = pf' - f \quad (4.27)$$

Fazendo $\dot{A} = \frac{dA}{dT} = p$, então

$$\ddot{A} = \frac{d(\dot{A})}{dT} = \frac{d\left(\frac{dA}{dT}\right)}{dT} = \frac{d^2A}{dT^2} = \frac{d\left(\frac{dA}{dT}\right)}{dp} \frac{dp}{dT} = \frac{d(p)}{dp} \frac{1}{f''(p)} \quad (4.28)$$

Resultando em:

$$\ddot{A} = \frac{1}{f''(p)} \quad (4.29)$$

Substituindo as equações (4.23) e (4.29) em (4.22), obtém-se:



$$4(p)^{2m+3} + f'(p)f''(p)(p)^{2m+4} = (2)^{2m+4}(2-p)^m(pf'(p) + 2f(p))f''(p) \quad (4.30)$$

4.3 - Técnicas de resolução

A equação explicitada em (4.30) é uma equação diferencial de segunda ordem não-homogênea, não-linear e a coeficientes não-constantas.

Debiane (2000), em seu trabalho de doutorado, tratou uma equação semelhante, cuja topologia lhe permitia ainda aplicar o desenvolvimento em série de Taylor, o que não ocorre na equação (4.30) pelo fato da mesma apresentar termos não-lineares mais severos, com singularidade na vizinhança do problema de Ritter (1892).

A partir daí, algumas tentativas de resolução foram empreendidas, tentando aplicar, por exemplo, o método de Frobenius, a saber:

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{r+n} \quad (4.31)$$

onde $a_0 \neq 0$. Em outras palavras, r é o expoente do primeiro termo da série e a_0 seu coeficiente. Como parte da solução deve-se determinar:

- 1 – Os valores de r ;
- 2 – A relação de recorrência para os coeficientes a_n ;
- 3 – O raio de convergência da série $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{r+n}$.

O método supracitado mostrou-se não aplicável à resolução da equação (4.30) devido ao fato da forte não-linearidade da mesma. Então, partiu-se para uma análise termo a termo da equação (4.30), conforme se segue:

Se $p \rightarrow 0$, então,

$$(p)^{2m+3} > (p)^{2m+4} \quad (4.32)$$

e

$$(2 - p)^m \approx 2^m \quad (4.33)$$

Então, a equação (4.30) pôde ser reescrita na forma que se segue:

$$4(p)^{2m+3} = (2)^{2m+4} (2)^m (pf'(p) + 2f(p))f''(p). \quad (4.34)$$

Fazendo $A = 0$, o que verifica a solução de Ritter (1892), tem-se, $pf' \approx f$, e daí a equação (4.34) fica:

$$4(p)^{2m+3} = (2)^{2m+4} (2)^m 3pf'(p)f''(p). \quad (4.35)$$

Resolvendo a equação (5.34), chega-se a:

$$f'(p) = \sqrt{\frac{8p^{2m+3}}{(6m+9)2^{3m+4}}} \quad (4.36)$$

A partir da relação expressa pela equação (4.23) em que $T = f'(p)$, tem-se:

$$T = \sqrt{\frac{8p^{2m+3}}{(6m+9)2^{3m+4}}} \quad (4.37)$$

e isolando p , obtém-se:

$$p = \left[\frac{3T^2(2m+3)2^{3m+4}}{8} \right]^{\frac{1}{2m+3}} \quad (4.38)$$

Ainda da relação dada pela equação (4.23), sabe-se que $\dot{A} = p$, e então,

$$\dot{A} = \left[\frac{3T^2(2m+3)2^{3m+4}}{8} \right]^{\frac{1}{2m+3}} \quad (4.39)$$

Fazendo a derivação de $\dot{A}$ com relação ao tempo, resulta em:



$$\frac{dA}{dt} = \frac{dA}{dT} \frac{dT}{dt} \quad (4.40)$$

Agora substituindo as equações (4.18) e (4.19), devidamente derivadas com relação ao tempo, e a equação (4.39) na equação (4.40), obtém-se a equação para a velocidade da frente, segundo a lei constitutiva de Ostwald ou fluido potência:

$$\dot{a} = 2\sqrt{gh_0} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{(6m+9)2^{\frac{3m+4}{2m+3}}}{8} \right] (K_2 t)^{\frac{2}{2m+3}} \right\} \quad (4.41)$$

como solução funcional da equação (4.30).

4.4 – Determinação da velocidade da frente de material viscoso e visco-plástico

Vale ressaltar que a idéia da determinação da velocidade da frente de lama pode ser obtida da seguinte forma:

1 – se $k_m = \mu$ e $m = 1$, obtém-se a expressão da velocidade da onda para um fluido Newtoniano viscoso, donde,

$$\dot{a} = 2\sqrt{gh_0} \left[1 - \frac{1}{2} (240)^{\frac{1}{5}} (K_2 t)^{\frac{2}{5}} \right] \quad (4.42)$$

2 – se $k_m = \tau_c$ (tensão crítica) e $m = 0$, obtém-se a expressão da velocidade da frente da onda quando da presença única de tensão crítica, donde,

$$\dot{a} = 2\sqrt{gh_0} \left[1 - \frac{1}{2} (18)^{\frac{1}{3}} (K_2 t)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (4.43)$$

3 – Finalmente, para um fluido obedecendo a uma reologia preferencialmente Herschel-Bulkley $\tau = \tau_c + k_m \dot{\gamma}^m$ (proposta inicial), propõe-se uma expressão funcional

para a velocidade de propagação da onda como sendo a solução clássica de Ritter (1892) subtraída dos termos de resistência devido à contribuição do fluido “lei potência” e fluido lei “tensão crítica”. Assim posto, a proposta de modelagem para a lei da frente de lama fica:

$$\dot{a} = 2\sqrt{gh_0} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[(18)^{\frac{1}{3}} (K_2 t)^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{(6m+9)2^{3m+4}}{8} \right)^{\frac{1}{2m+3}} (K_2 t)^{\frac{2}{2m+3}} \right] \right\} \tag{4.44}$$

4.4.1 - Teste de sensibilidade de parâmetros da proposta teórica de determinação da velocidade da frente de material viscoso e visco-plástico

Com base nos resultados teóricos obtidos no item 4.4, são ilustrados na seqüência, conforme Figuras 20, 21, 22 e 23, leis de evolução de X_f (posição da frente) x tempo, hipotético, para os diversos modelos reológicos.

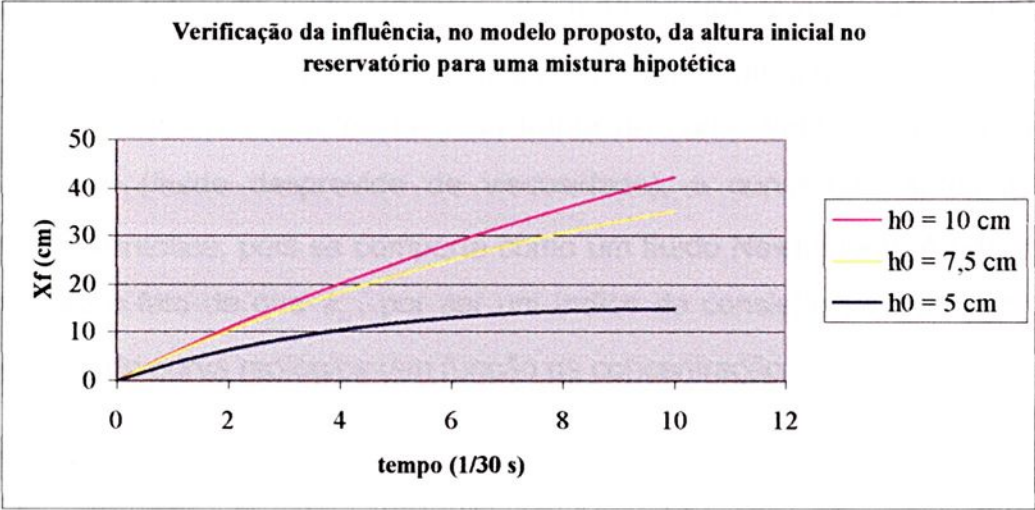


Figura 20 – Sensibilidade do modelo proposto para diferentes alturas iniciais no reservatório.

Da Figura 20, nota-se que o parâmetro h_0 (altura inicial no reservatório) tem uma significativa importância no que tange à determinação da velocidade de propagação da onda de ruptura, isto porque na equação (4.21), o parâmetro h_0 aparece no denominador diminuindo K_2 . Como o mesmo é levado em consideração



somente na segunda parcela da equação (4.44), ou seja, na parcela atritiva, a velocidade de propagação da frente de onda é maior para maiores alturas iniciais no reservatório. Ademais, observa-se uma tendência assintótica para tempos elevados.

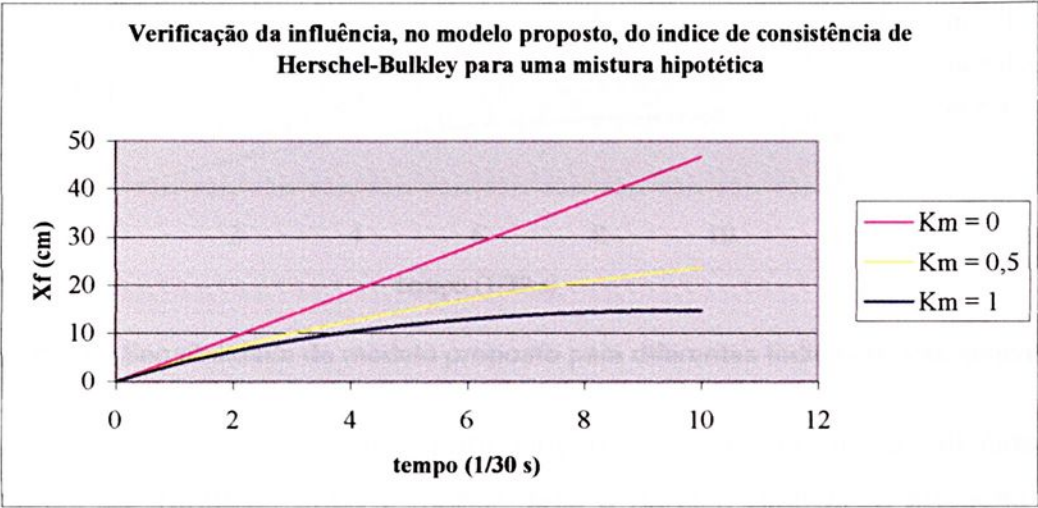


Figura 21 – Sensibilidade do modelo proposto para diferentes índices de consistência (k_m).

Da Figura 21, verifica-se que o índice de consistência também, como o h_0 , tem grande importância no que diz respeito à determinação da velocidade de propagação da frente de onda. Como k_m é um parâmetro do numerador da equação (4.21), quanto maior esse parâmetro, maior a parcela atritiva (2º termo da equação (4.44)) e então, menor a velocidade da frente de onda. Verificou-se também que para $k_m = 0$ (fluido desprovido de viscosidade), a curva não apresenta uma tendência assintótica, pois se comporta como um fluido Newtoniano. Ainda se deve atentar para o fato de que k_m , por ser um índice de consistência, varia de acordo com o ajuste da curva reológica (em função da concentração).



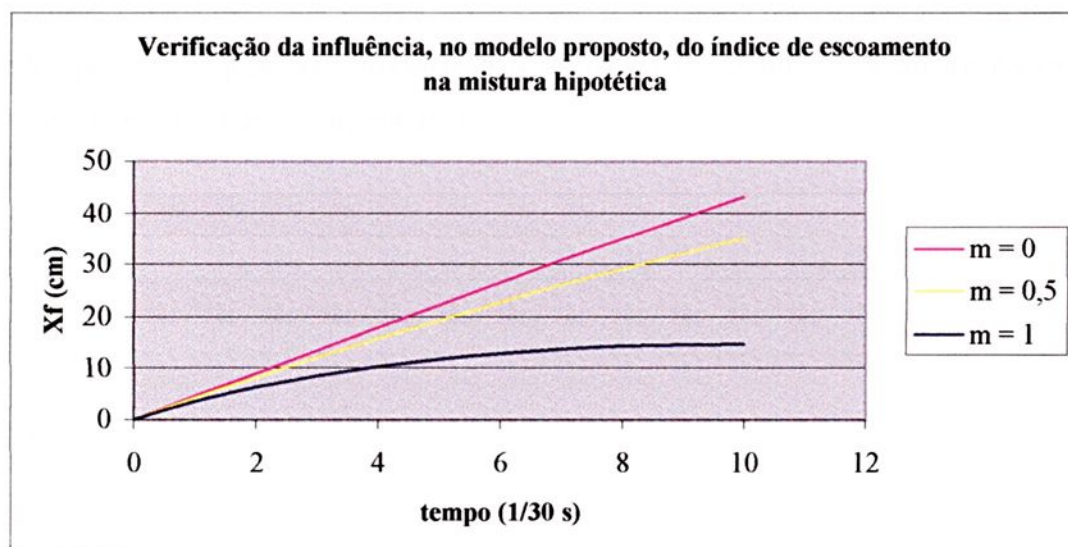


Figura 22 – Sensibilidade do modelo proposto para diferentes índices de escoamento.

Na Figura 22, nota-se que para elevados valores de m , a velocidade de propagação da frente de onda é menor, pois a parcela atritiva da equação (4.44) aumenta com o aumento do índice de escoamento, diminuindo a velocidade de propagação da frente de lama. E da mesma forma com que acontece com o índice de consistência k_m o índice de escoamento é ajustado pelo software Rheotest 2000, variando em conjunto com o k_m , mas ainda assim, o modelo mostra-se sensível ao referido índice de escoamento.

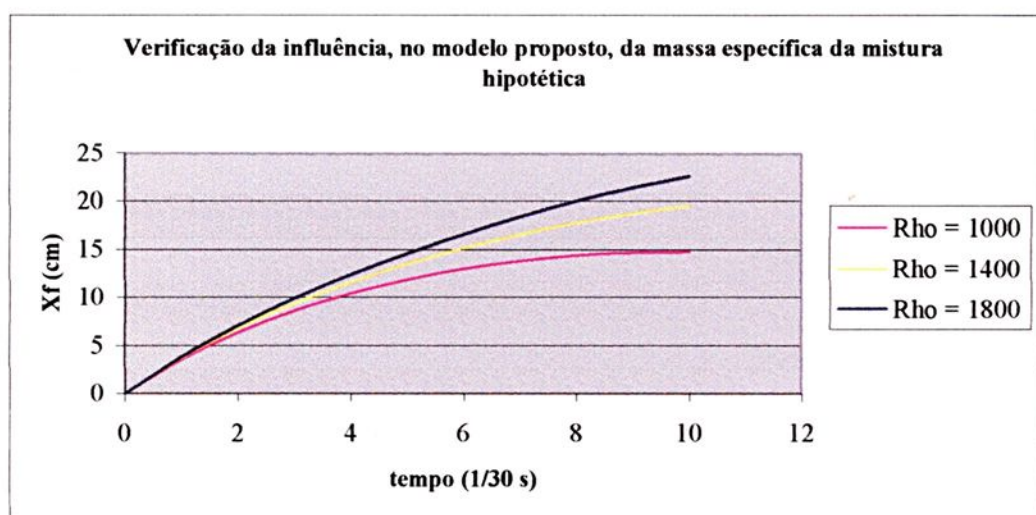


Figura 23 – Sensibilidade do modelo proposto para diferentes massas específicas do fluido.

Em primeira análise, pela Figura 23, o parâmetro massa específica da mistura não se mostrou tão significativo quanto aos demais parâmetros analisados, pois sob

as mesmas condições dos testes anteriores, a variação na velocidade da frente de lama foi pequena quando comparada à variação na velocidade da frente para os parâmetros anteriormente analisados.



V RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DA MISTURA ÁGUA + ARGILA CAULÍNÍTICA

5.1 - Análise do pH

As diferenças no comportamento reológico das misturas (Figura 24) em função da variação do pH de água de torneira + sal (pH = 4,35), água de torneira (pH = 5,71), água destilada + sal (pH = 4,13) e água destilada (pH = 5,57), mostram uma maior tensão de cisalhamento na mistura com menor pH e água de torneira + sal e, menor valor na mistura com maior pH e água destilada. Todas as misturas estavam na concentração de 10% em volume. Para misturas com concentração de 15% (Figura 25) em volume, foi verificado um aumento das tensões de cisalhamento das misturas onde se pôde identificar um ligeiro distanciamento entre as curvas de tensão x taxa de deformação.

O fato descrito acima foi caracterizado por Lledo dos Santos (2003) e confirmado durante a realização deste trabalho.

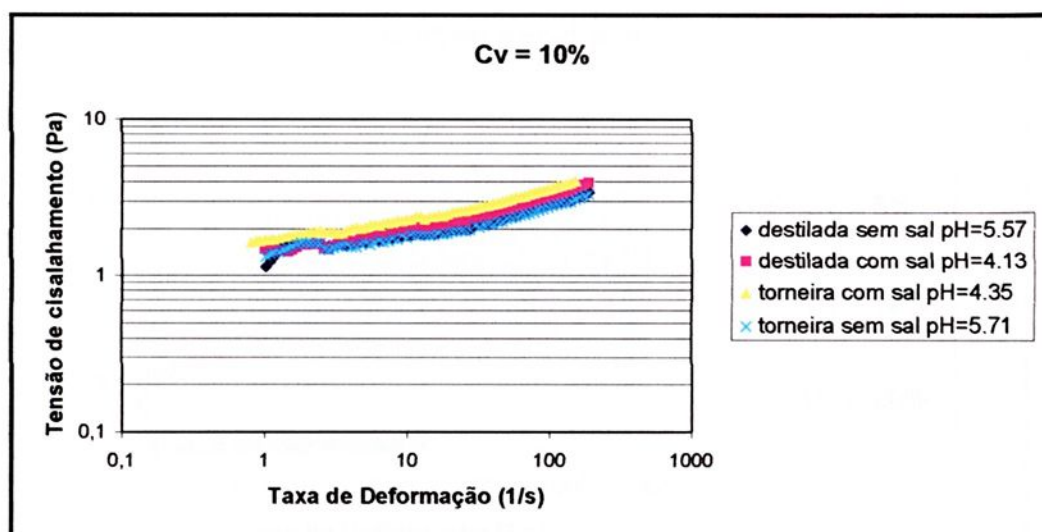


Figura 24 - Variação das curvas (tensão x deformação) em função do pH.

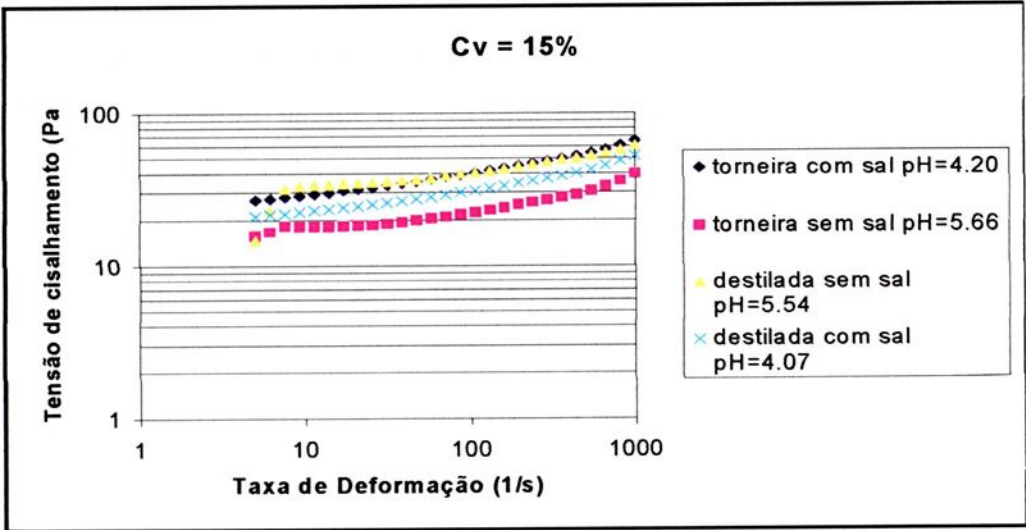


Figura 25 - Variação das curvas (tensão x deformação) em função do pH.

5.2 - Influência da concentração em volume para mistura água + argila caulinítica

A concentração em volume é um dos parâmetros físicos que influenciam mais fortemente no comportamento de escoamento dos fluidos estudados. Dessa forma, variando-se apenas a concentração em volume de argila nas misturas (mantendo-se o mesmo tipo de argila caulinítica, pH) obtém-se um significativo ganho na tensão de cisalhamento da mistura de 5% para a mistura de 12% e 20% de concentração em volume, conforme mostra a Figura 26.

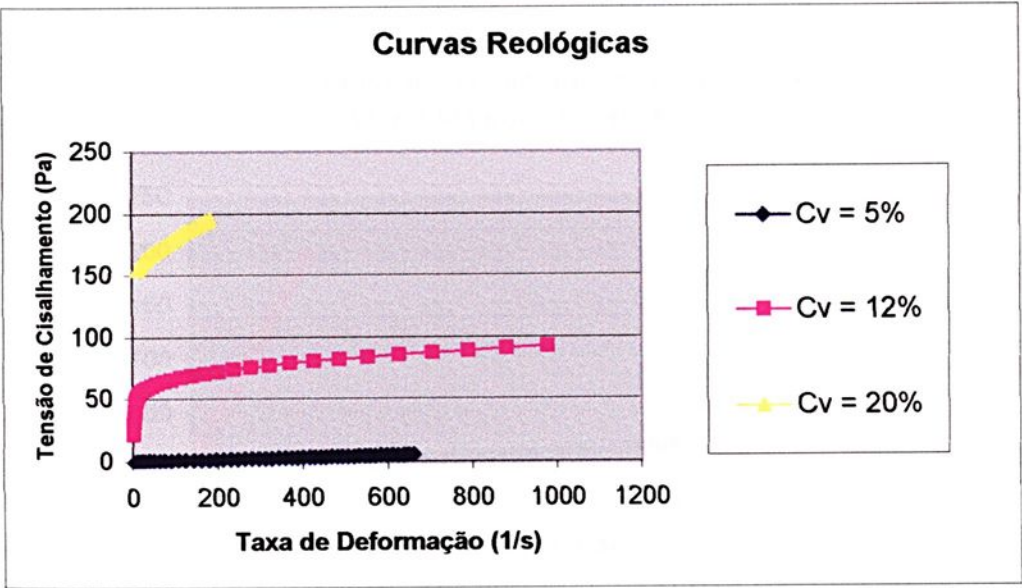


Figura 26 - Influência da variação C_v na curva reológica.



Na Figura 26, verifica-se que para uma concentração da ordem de 12% e 20%, a curva de melhor ajuste é a do tipo Herschel-Bulkley $\tau = \tau_c + k_m \dot{\gamma}^m$ com os seguintes parâmetros:

$$\tau_{12\%} = 22,034 + 3,028 \dot{\gamma}^{0,47} \quad (5.1)$$

$$\tau_{20\%} = 145,94 + 7,518 \dot{\gamma}^{0,36} \quad (5.2)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento, τ_c é a tensão crítica de cisalhamento, k_m é o índice de consistência, m é o índice de escoamento e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação.

Já para a concentração de 5%, a curva de melhor ajuste foi a do tipo Newtoniana com a seguinte equação de ajuste:

$$\tau_{5\%} = 0,0090526 \dot{\gamma} \quad (5.3)$$

onde $\mu = 0,0090526$ é a viscosidade dinâmica em (Pa.s) (da ordem de 10 vezes a da água).

5.3 - Influência da concentração em massa para mistura água + açúcar

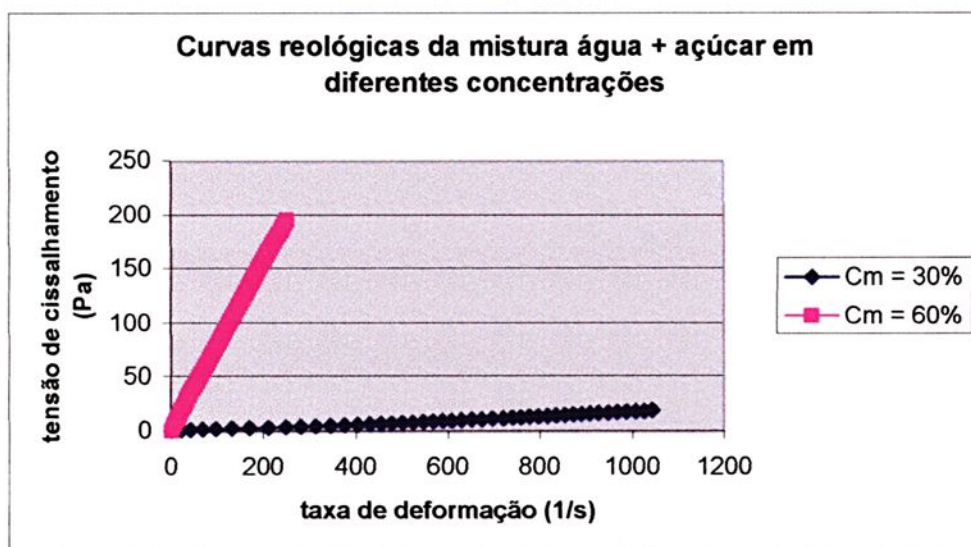


Figura 27 - Influência da variação C_m na curva reológica.

Para verificar a influência da concentração em volume da mistura água + açúcar, far-se-ia necessário a determinação do parâmetro massa específica dos grãos. Como não foi possível determiná-lo com acurácia, optou-se pela realização dos ensaios com concentração em massa, uma vez que a quantificação da mesma não exige o conhecimento da massa específica dos grãos.

Da Figura 27, verifica-se que em ambas as concentrações, o comportamento reológico das misturas seguem o modelo Newtoniano $\tau = \mu \dot{\gamma}$, com os seguintes ajustes:

$$\tau_{30\%} = 0,0171 \dot{\gamma} \quad (5.4)$$

e

$$\tau_{60\%} = 0,787 \dot{\gamma} \quad (5.5)$$

onde $\mu_{30\%} = 0,0171 Pa.s$ e $\mu_{60\%} = 0,787 Pa.s$ são as viscosidades dinâmicas para as misturas com concentrações de 30% e 60% em massa.

5.4 - Análise da ocorrência de tixotropia

Conforme Lledo dos Santos (2003), para uma concentração de 15% em volume, aplicando uma deformação de 0 a $500 s^{-1}$ durante 180 segundos e descarregando de 500 a $0 s^{-1}$ em 180 segundos (Figura 28) tem-se o seguinte resultado:

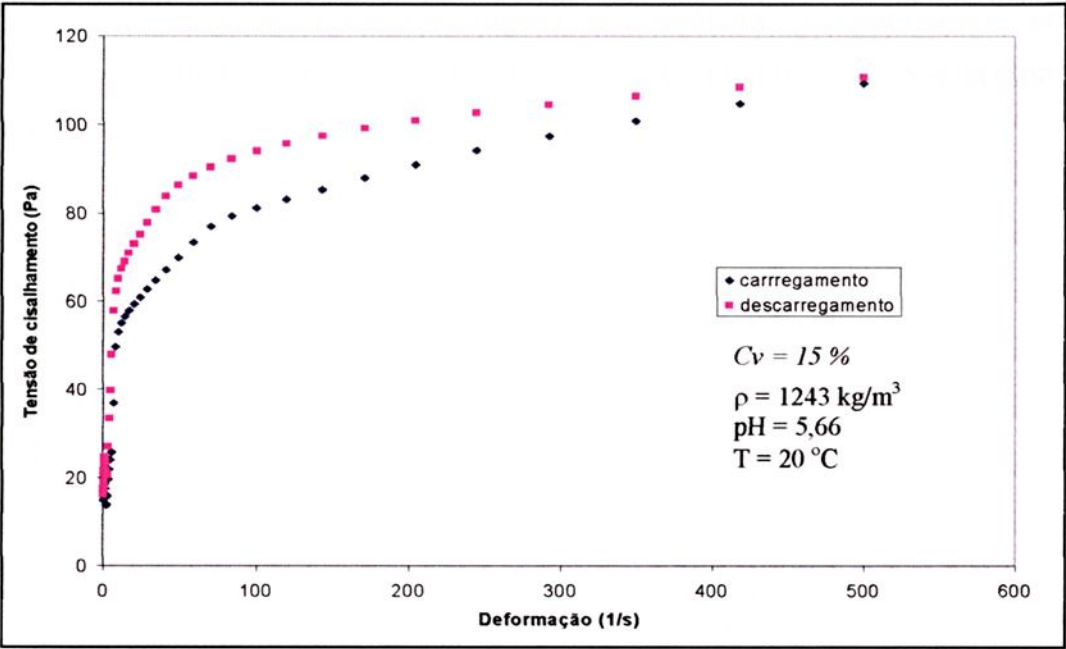


Figura 28 - Análise de tixotropia sem intervalo entre carregamento e descarregamento.

Mantendo a mesma amostra, aplicou-se uma deformação de 0 a 500 s⁻¹ durante 180 segundos, agora com um intervalo de repouso de 10 s (Figura 29) entre carregamento e descarregamento.

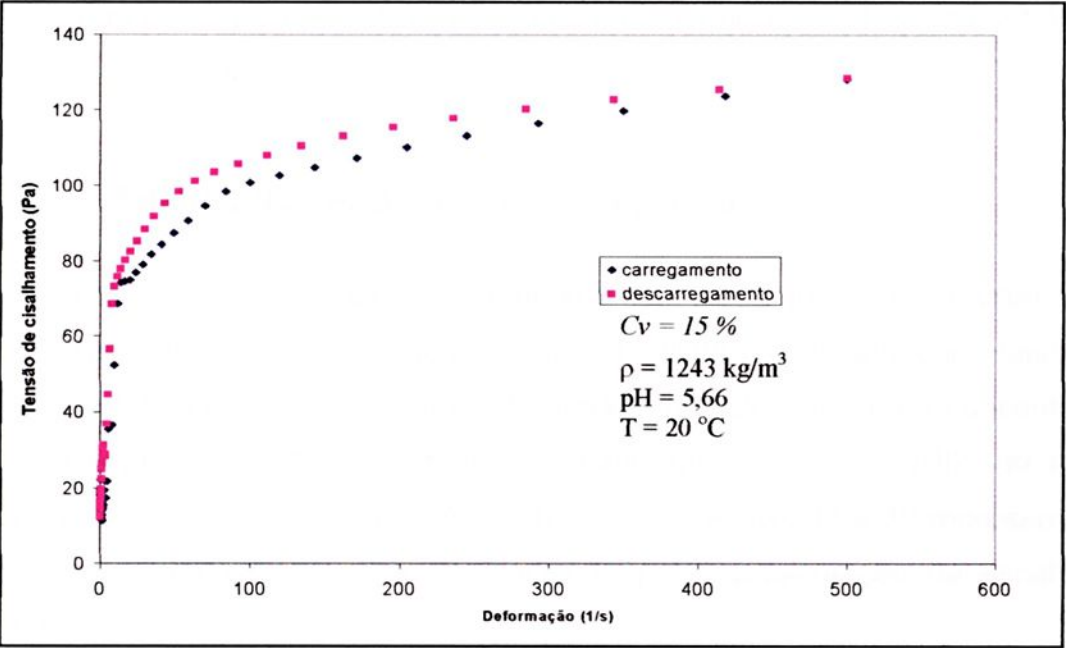


Figura 29 - Análise de tixotropia com intervalo de 10s de repouso.

Para os ensaios seguintes, seguiu-se a mesma sistemática, no entanto, aumentou-se o tempo de repouso entre o carregamento e o descarregamento conforme Figura 30.

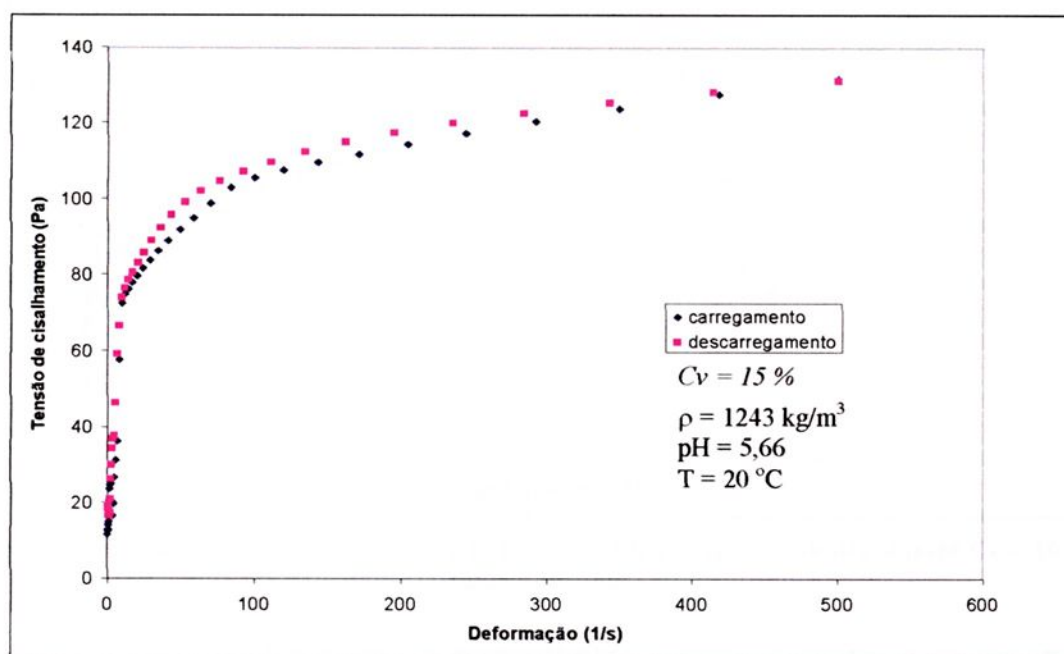


Figura 30 - Análise de tixotropia com intervalo de 30s de repouso.

Como se pôde verificar, para os casos apresentados nas Figuras 28, 29 e 30, a mistura água + argila caulinitica apresenta características tixotrópicas, ainda que não tão pronunciadas.

5.5 - Análise da variação da temperatura

Os resultados que se seguem, de acordo com Lledo dos Santos (2003), têm o intuito de elucidar algumas características da mistura ensaiada com relação à variação da temperatura. Para uma determinada amostra com uma concentração pré-estabelecida ($C_v = 10\%$), variou-se a temperatura com o auxílio do banho térmico numa faixa da ordem de 10°C a 80°C . As Figuras 31 e 32 representam a variação supracitada apenas se diferenciando pela apresentação da escala por conveniência.

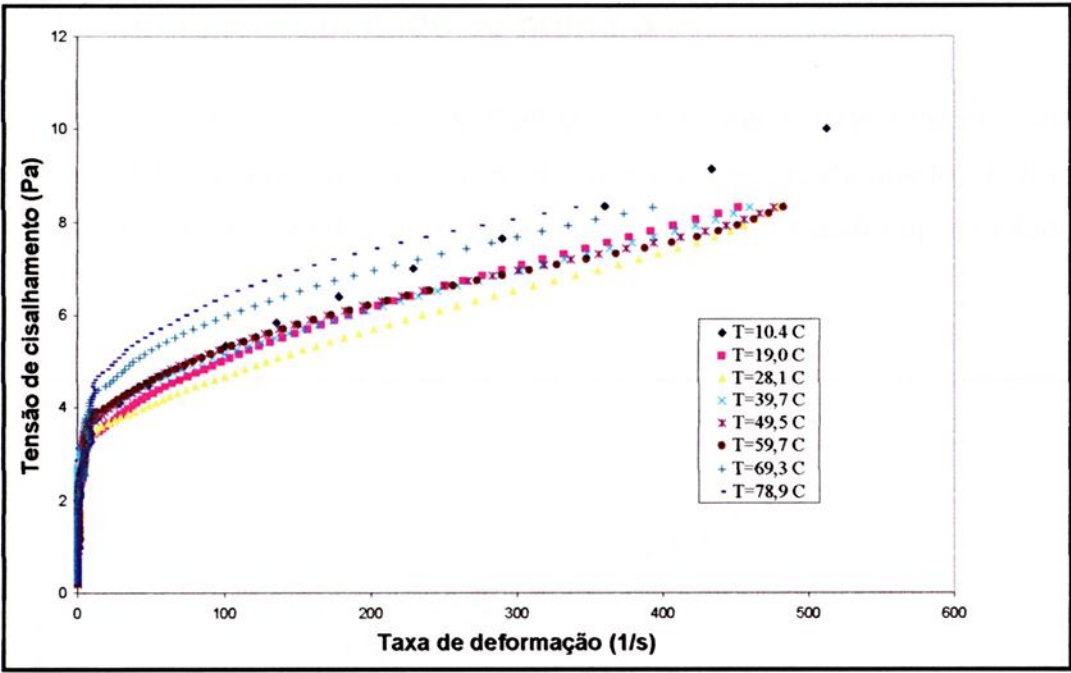


Figura 31 - Variação das curvas de escoamento em função da temperatura para $C_v = 10\%$ em escala normal.

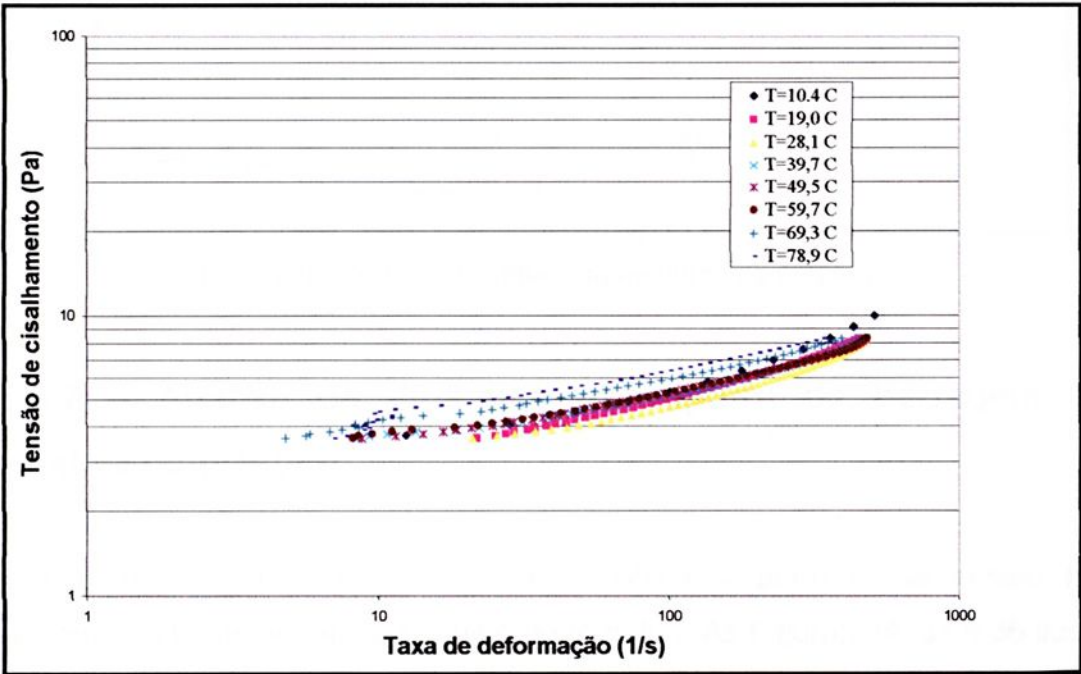


Figura 32 - Variação das curvas de escoamento em função da temperatura para $C_v = 10\%$ em escala logarítmica.

Como se pôde analisar, a variação da temperatura na amostra parece não influenciar de forma significativa na curva de escoamento da mistura em questão, sobretudo se considerada uma faixa de temperatura em torno da temperatura ambiente ($0\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$).

5.6 - Influência do modo de preparo

Foi observado, por Lledo dos Santos (2003), que o modo de preparo não influencia significativamente na curva de tensão de cisalhamento x taxa de deformação. Os dados obtidos de ensaios com o Reômetro estão apresentados na Figura 33:

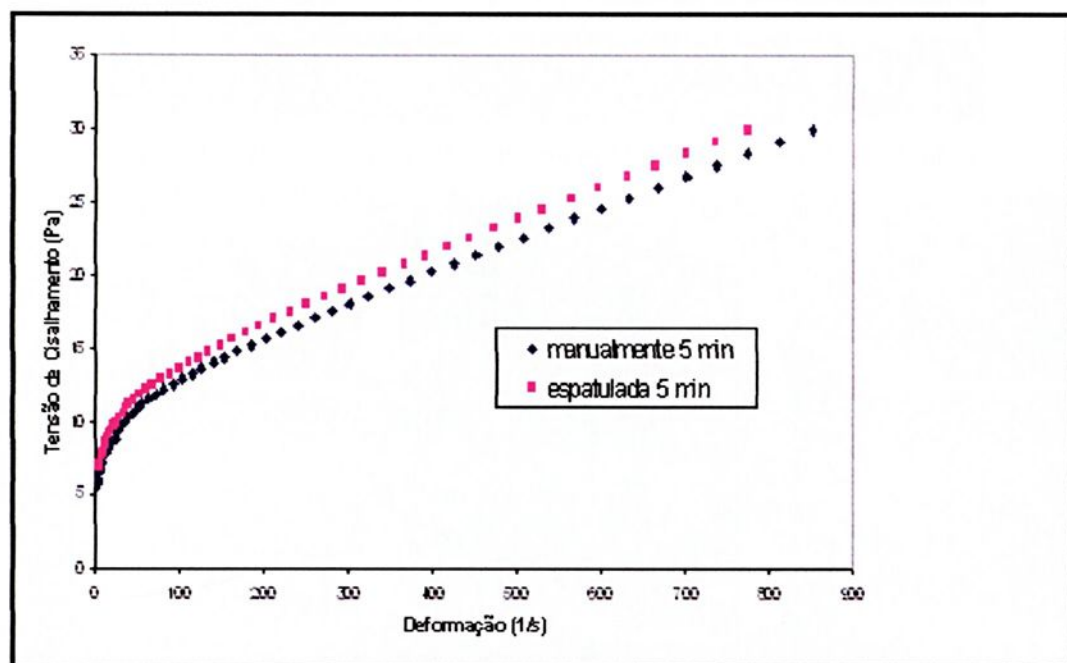


Figura 33 - Análise da influência do modo de preparo.

5.7 – Análise da dinâmica da ruptura de barragem com material visco-plástico

Algumas tentativas para se definir critérios e padrões de ensaio foram exaustivamente feitas no seio da equipe de trabalho. As Figuras 34, 35 e 36 ilustram os primeiros ensaios realizados no canaleta 1, com a mistura água + argila caulinítica.

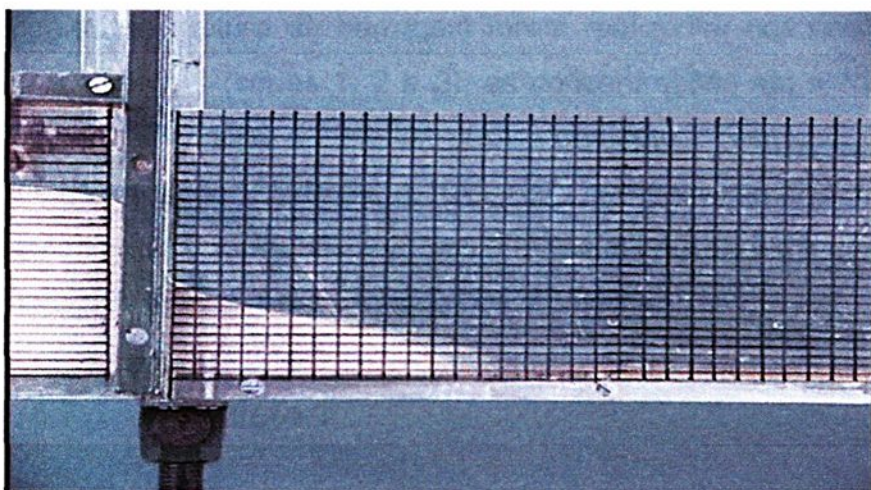


Figura 34 - Ensaio no canal piloto da mistura água + argila caulinítica.

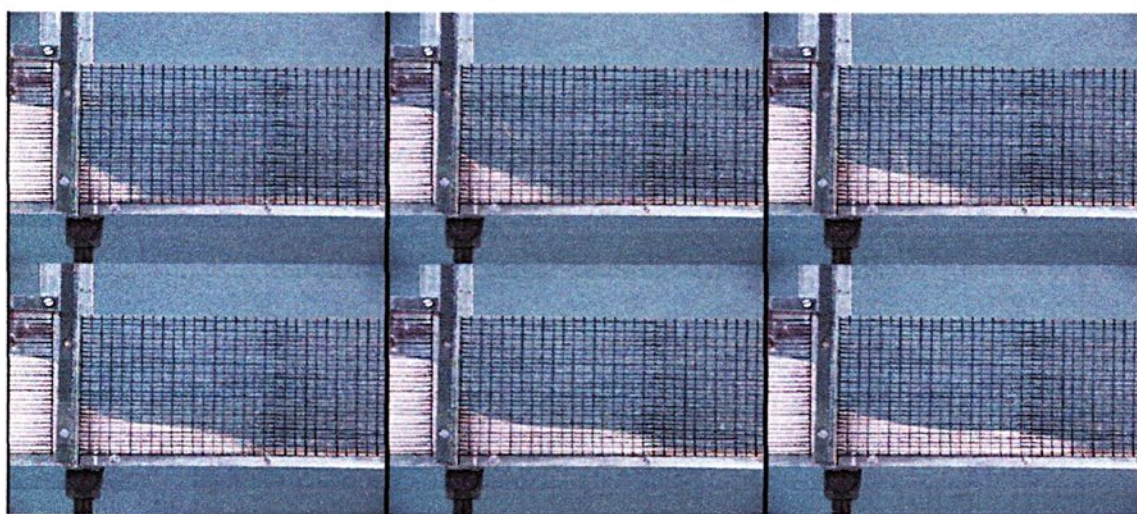


Figura 35 - Ensaio no canal piloto da mistura água + argila caulinítica, ilustrando a evolução no tempo da frente produzida pelo içamento da comporta ("ruptura").



Figura 36 - Vista frontal do ensaio com a mistura água + argila caulinítica.

Os ensaios de ruptura de barragem foram realizados nos canaletes 1 e 2, sendo que no canaleta 1 (séries 1, 2 e 3), as concentrações em volume de argila caulinítica foram de 5%, 12% e 20%. Já para o canaleta 2 (séries 4, 5, 6 e 7), as concentrações utilizadas foram de 5% e 10%, visto que para maiores concentrações há muita dificuldade de trabalhabilidade com o material na realização dos ensaios de ruptura de barragem e nos próprios ensaios de reometria.

5.7.1 - Canaleta 1

→ Série 1:

Nas Figuras 37 e 38, a concentração em volume (C_v) da mistura é de 5%, 0° de inclinação e altura inicial no reservatório de 7 cm.

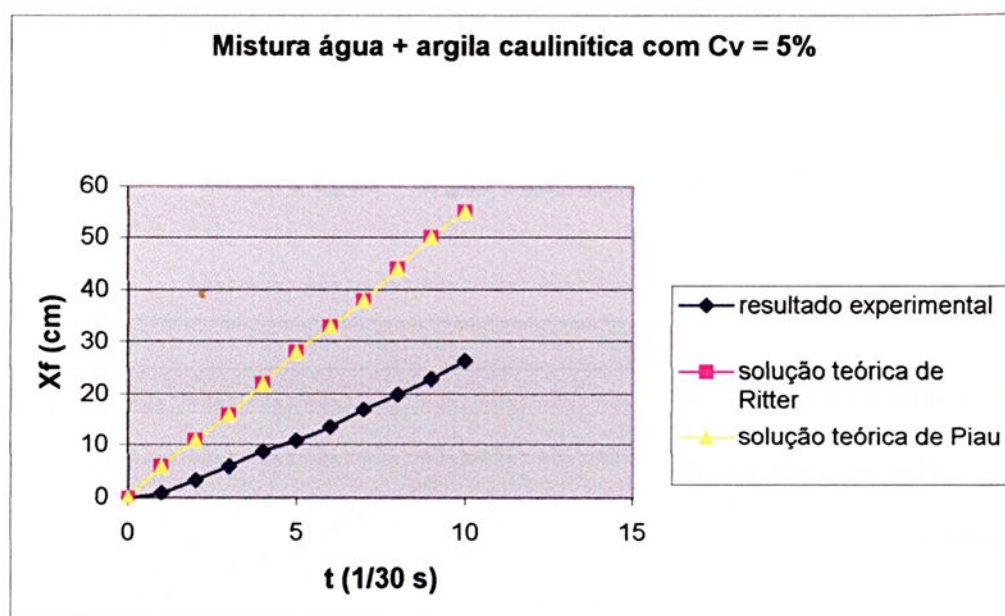


Figura 37 - Comparação da posição da frente de onda experimental X_f em função do tempo com as soluções teóricas de Ritter (1892) e Piau (1995).

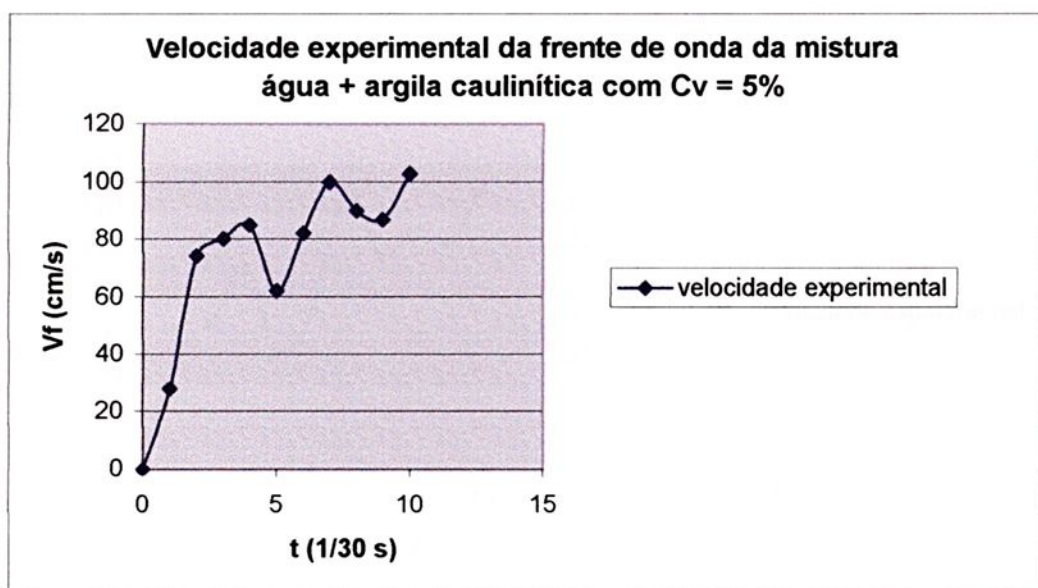


Figura 38 - Evolução experimental da velocidade da frente de onda V_f em função do tempo.

Nas Figuras 39 e 40, a concentração em volume (C_v) da mistura é de 5%, 2° de inclinação e altura inicial no reservatório de 7,5 cm.

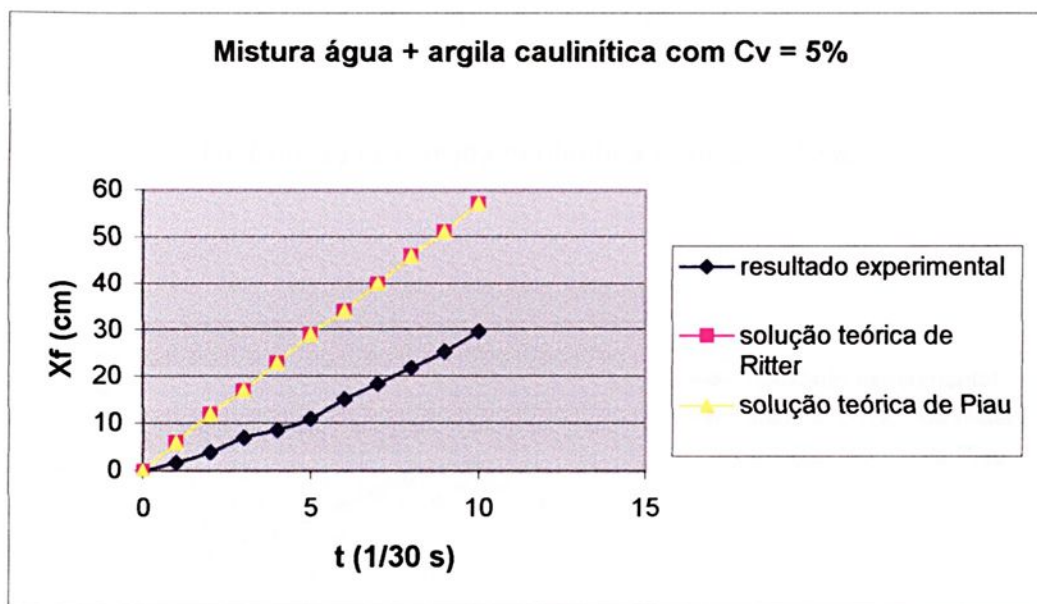


Figura 39 - Comparação da posição da frente de onda experimental X_f em função do tempo com as soluções teóricas de Ritter (1892) e Piau (1995).

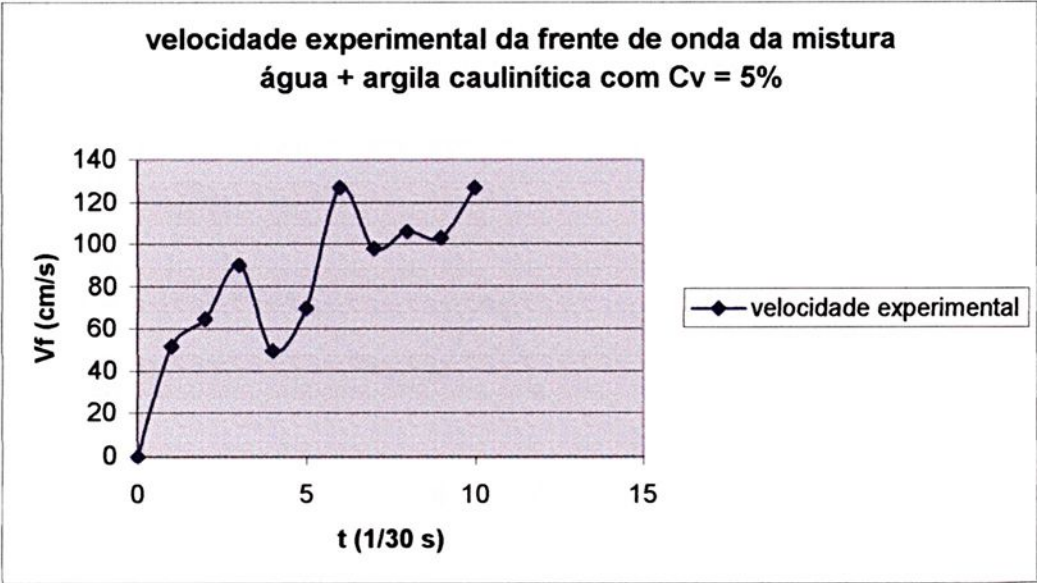


Figura 40 - Evolução experimental da velocidade da frente da onda.

→ Série 2:

Nas Figuras 41 e 42, a concentração em volume (C_v) da mistura é de 12%, 0° de inclinação e altura inicial no reservatório de 10 cm.

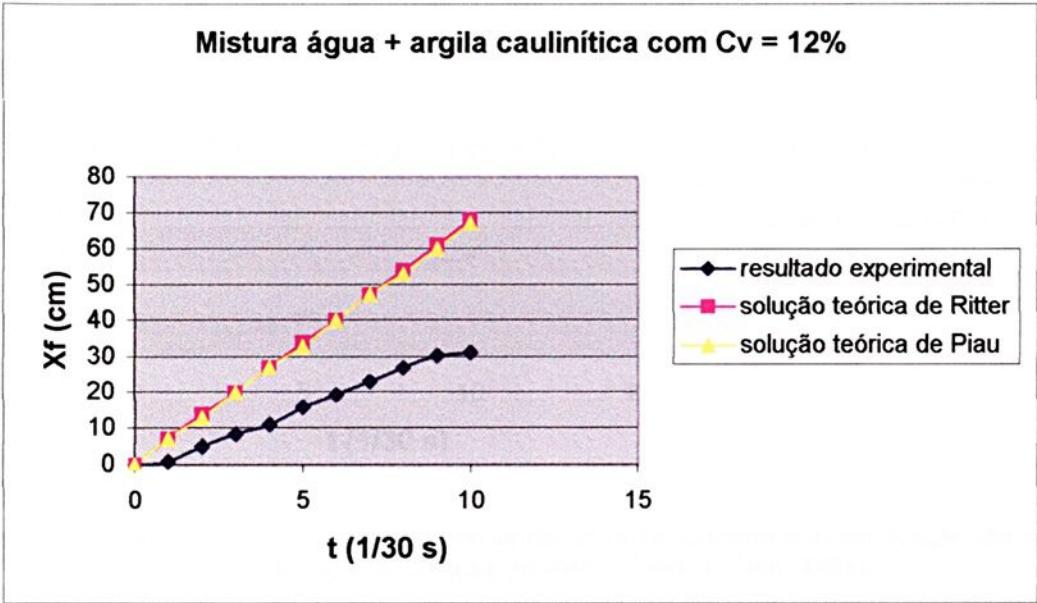


Figura 41 - Comparação da posição da frente de onda experimental X_f em função do tempo com as soluções teóricas de Ritter (1892) e Piau (1995).

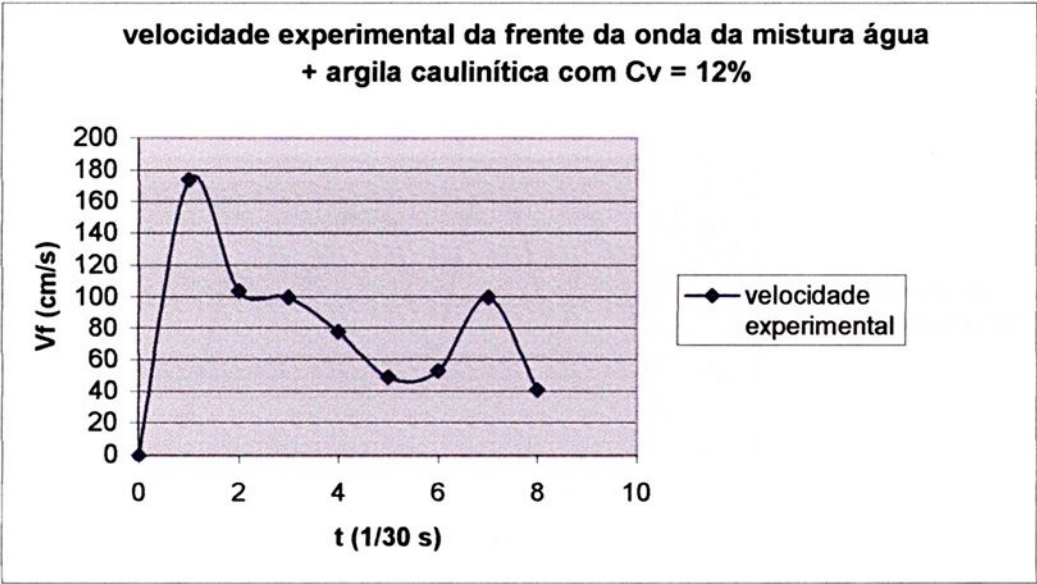


Figura 42 - Evolução experimental da velocidade da frente da onda V_f em função do tempo.

Nas Figuras 43 e 44, a concentração em volume (C_v) da mistura é de 12%, 2º de inclinação e altura inicial no reservatório de 12 cm.

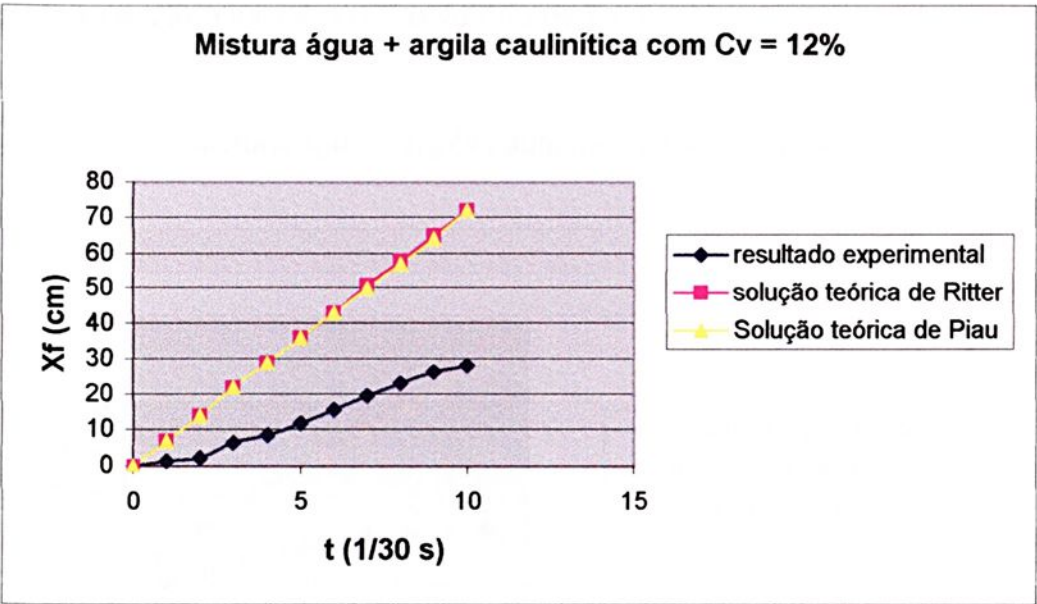


Figura 43 - Comparação da posição da frente de onda experimental X_f em função do tempo com as soluções teóricas de Ritter (1892) e Piau (1995).

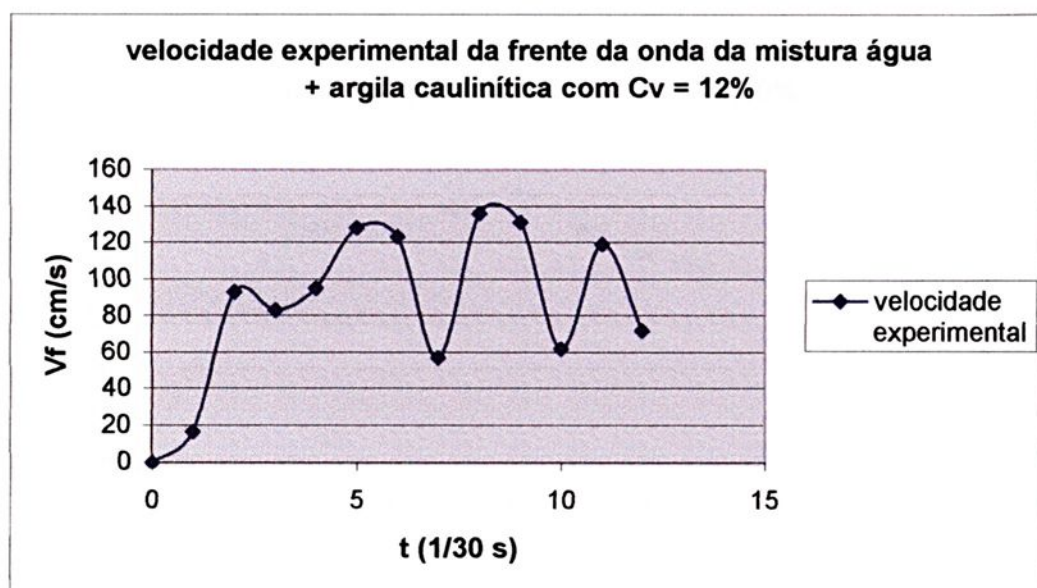


Figura 44 - Evolução experimental da velocidade da frente da onda V_f em função do tempo.

→ **Série 3:**

Nas Figuras 45 e 46, a concentração em volume (C_v) da mistura é de 20%, 0° de inclinação e altura inicial no reservatório de 9 cm.

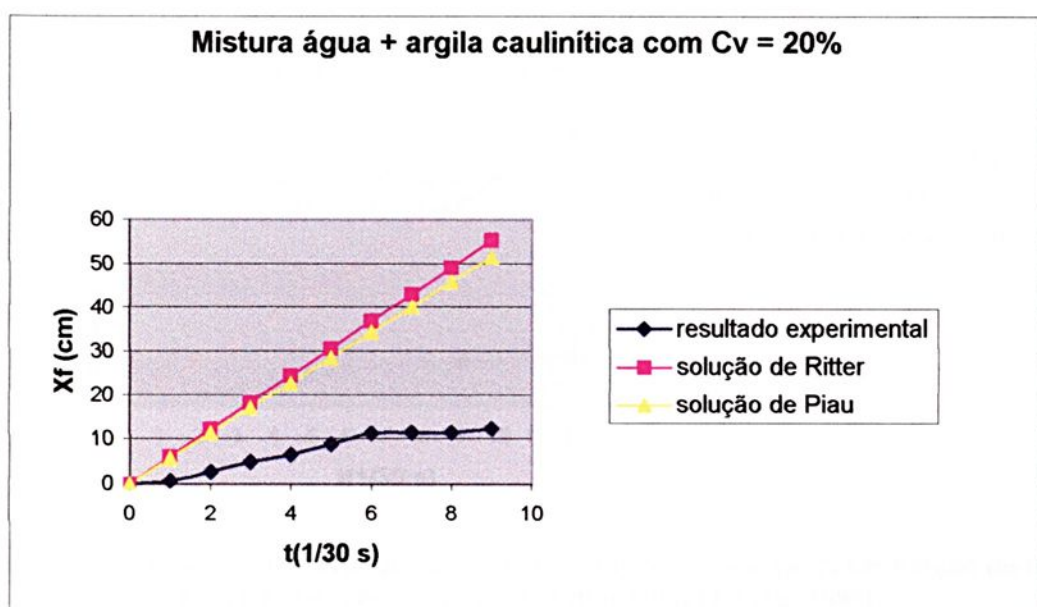


Figura 45 - Comparação da posição da frente de onda experimental X_f em função do tempo com as soluções teóricas de Ritter (1892) e Piau (1995).

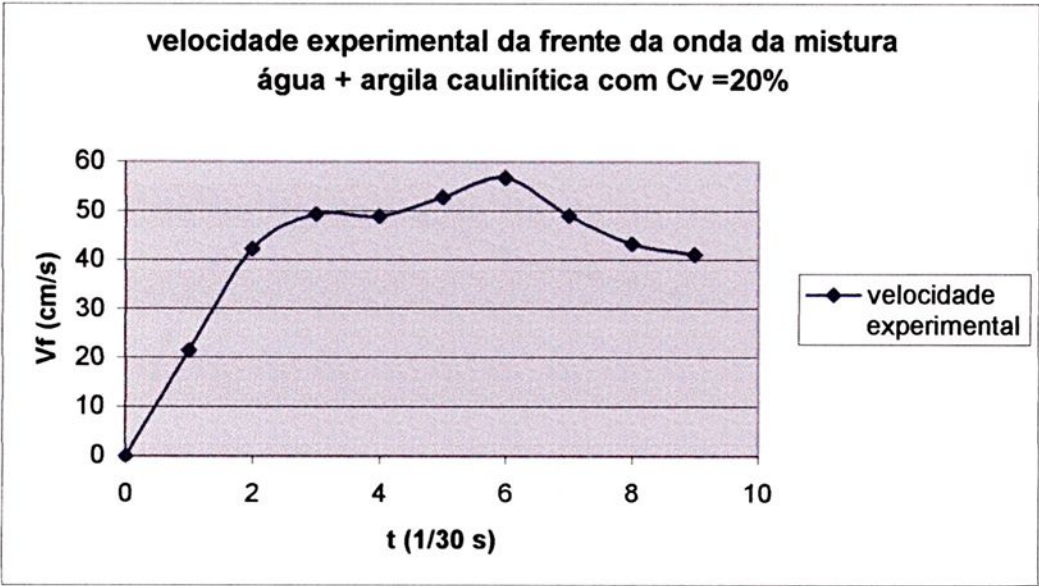


Figura 46 - Evolução temporal da velocidade da frente da onda V_f em função do tempo.

Nas Figuras 47 e 48, a concentração em volume (C_v) da mistura é de 20%, 2º de inclinação e altura inicial no reservatório de 8,5 cm.

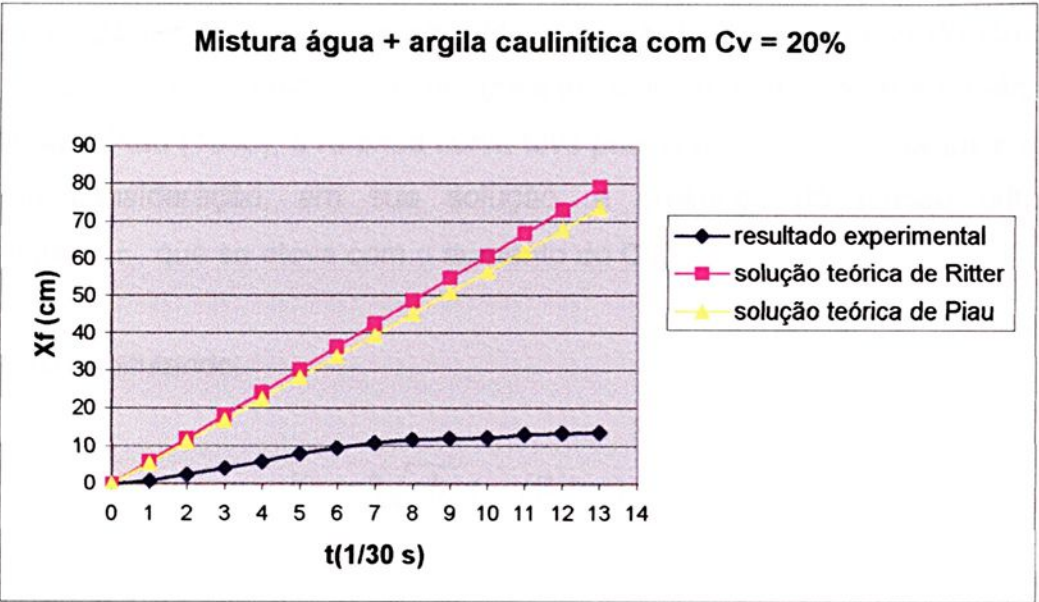


Figura 47 - Comparação da posição da frente de onda experimental X_f em função do tempo com as soluções teóricas de Ritter (1892) e Piau (1995).

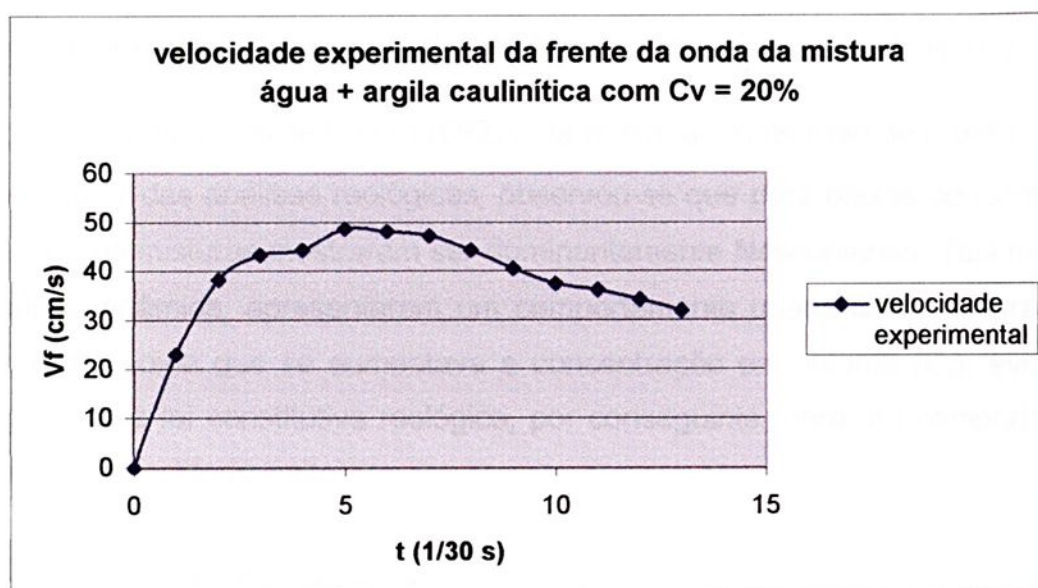


Figura 48 - Evolução temporal da velocidade da frente da onda.

5.7.1.1 - Comentário dos resultados obtidos a partir dos ensaios preliminares

Não houve diferença no comportamento da curva de X_f em função do tempo, de Ritter (1982), para diferentes concentrações em volume, como esperado (séries 1, 2 e 3). Já para Piau (1995), a referida curva teve pouca variação, isto porque o mesmo leva em consideração, em sua solução, a presença da tensão crítica de cisalhamento τ_c , que se eleva com o aumento do C_v .

- Recapitulando:

$$X_f = 2\sqrt{gh_0} \, t \quad (\text{Ritter}) \quad (5.6)$$

$$X_f = \left(2\sqrt{gh_0 \cos \alpha - \frac{\varphi \tau_c}{\rho}} \right) t \quad (\text{Piau}) \quad (5.7)$$

A aderência da solução de Piau (1995) com a de Ritter (1892), advém do fato que nesta pesquisa trabalha-se com canaletes de pequena declividade (diminuindo

assim, a interferência do $\cos \alpha$, e da tensão reduzida $\frac{\varphi \tau_c}{\rho}$ que se limitou à faixa de 0,10 ($\varphi = 1$)) e assim, X_r de Ritter (1892) é da ordem de X_r de Piau de (1995).

A partir das análises reológicas, observou-se que para baixas concentrações ($C_v \approx 5\%$), as misturas mostraram ser predominantemente Newtonianas. Tais misturas, na análise dinâmica, apresentaram um comportamento quase linear no gráfico de $X_r \times t$, e à medida que se aumentava a concentração em volume (C_v), evoluía-se para uma nova lei constitutiva reológica, por conseguinte, para um comportamento assintótico (velocidade limite).

5.7.2 - Canaleta 2

→ Série 4:

As Figuras 49, 50 e 51 mostram uma comparação da curva teórica de Ritter (1892) com a experimental e proposta de modelagem, a partir de ensaios realizados no canaleta 2 com concentrações em volume de 5%, 10% e 20%, 0° de inclinação e $h_0 = 5$ cm.

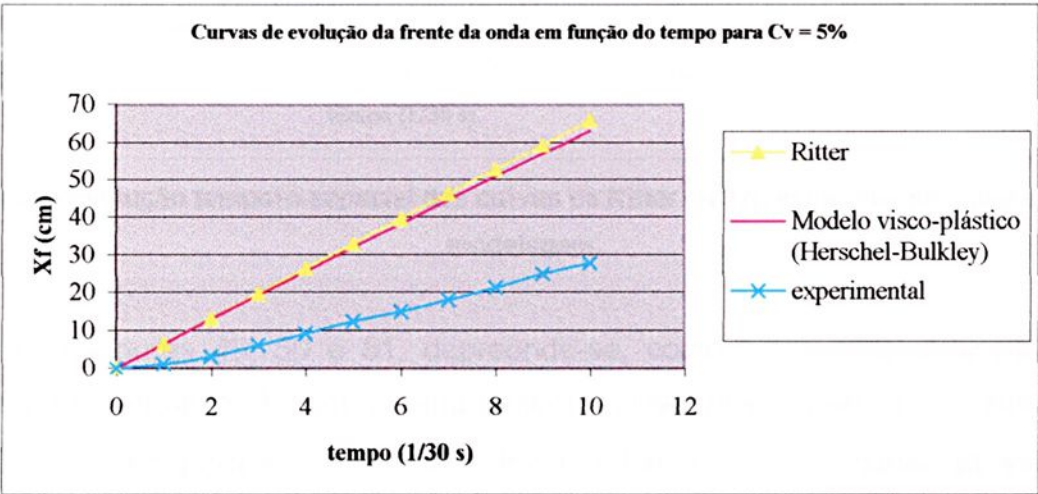


Figura 49 - Evolução temporo-espaial das curvas de Ritter (1892), experimental e proposta teórica.



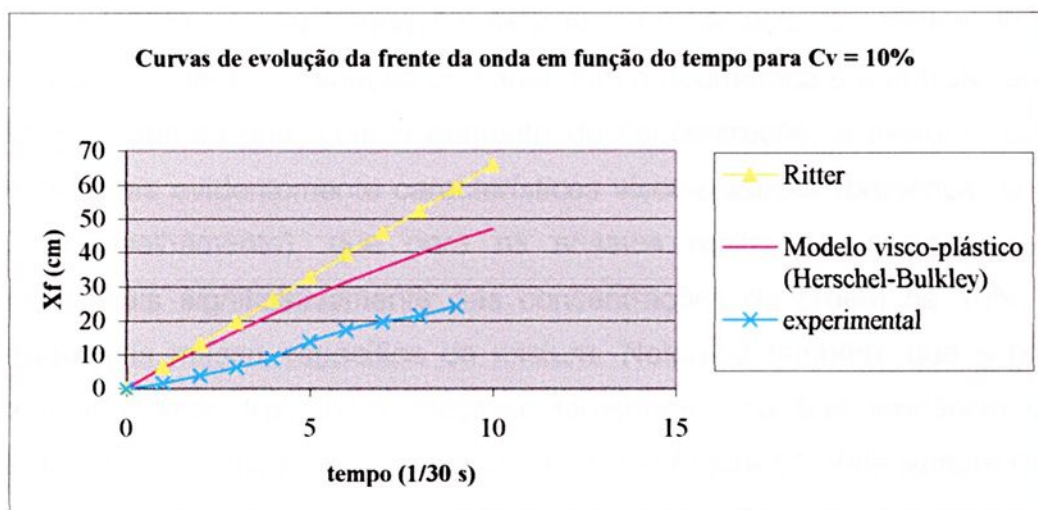


Figura 50 - Evolução temporo-espaial das curvas de Ritter (1892), experimental e proposta de modelagem.

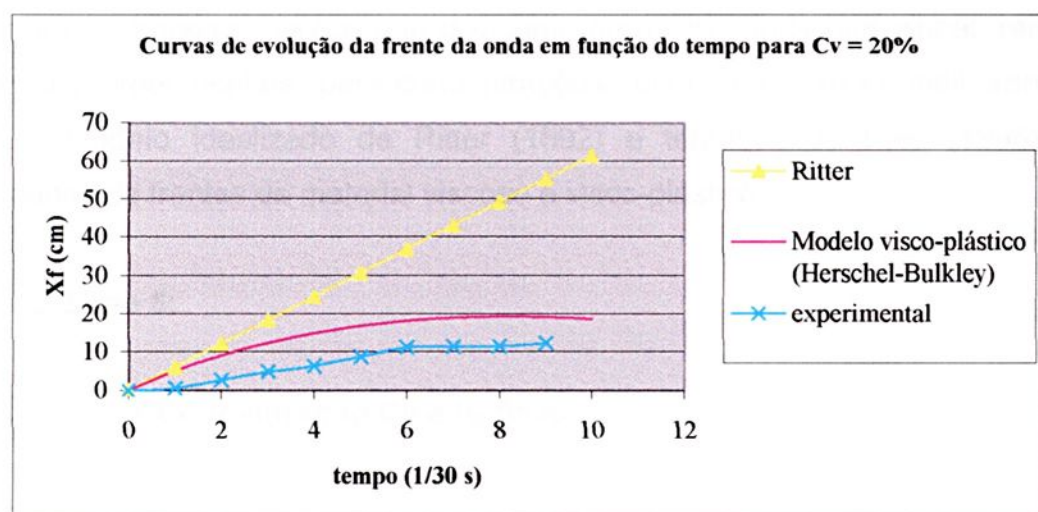


Figura 51 - Evolução temporo-espaial das curvas de Ritter (1892), experimental e proposta de modelagem.

Das Figuras 49, 50 e 51, depreende-se, como havia sido observado nos ensaios no canaleta 1, um comportamento Newtoniano para as misturas de $C_v \approx 5\%$. Ainda para concentrações desta ordem ($\approx 5\%$), a curva da evolução temporal da frente da onda (X_f) x tempo mostra-se praticamente linear, e a diferença entre a curva experimental e a curva obtida pela equação de Ritter (1892) existe pelo fato do mesmo tratar de um caso idealizado, o que não foi o caso deste trabalho.

Piau (1995), em sua equação, leva em consideração os efeitos da tensão crítica de cisalhamento, inclinação do canal, forma geométrica e a massa específica da mistura. Sabe-se que, com o aumento da concentração, a mistura começa a apresentar mais evidentemente características visco-plásticas (presença de tensão crítica de cisalhamento), que para os ensaios realizados, começaram a se pronunciar mais significativamente nas concentrações da ordem de 10%, sendo ponderada pela massa específica da mistura. Notou-se também, que a proposta teórica obtida neste trabalho começa a apresentar uma boa tendência quando comparada aos resultados experimentais, conforme Figura 51. Vale sempre ressaltar que ensaios dessa natureza mostram-se bastante sensíveis, notadamente aos parâmetros reológicos.

Dessa maneira, parece que o modelo proposto, ainda que global, reflete as tendências experimentais (para concentrações superiores a 10%), melhorando em muito o modelo idealizado de Ritter (1892) e tentativa de Piau (1995), para velocidades de frentes de material viscoso e visco-plástico.

→ **Série 5:**

→ **Concentração C_v e h_0 fixas**

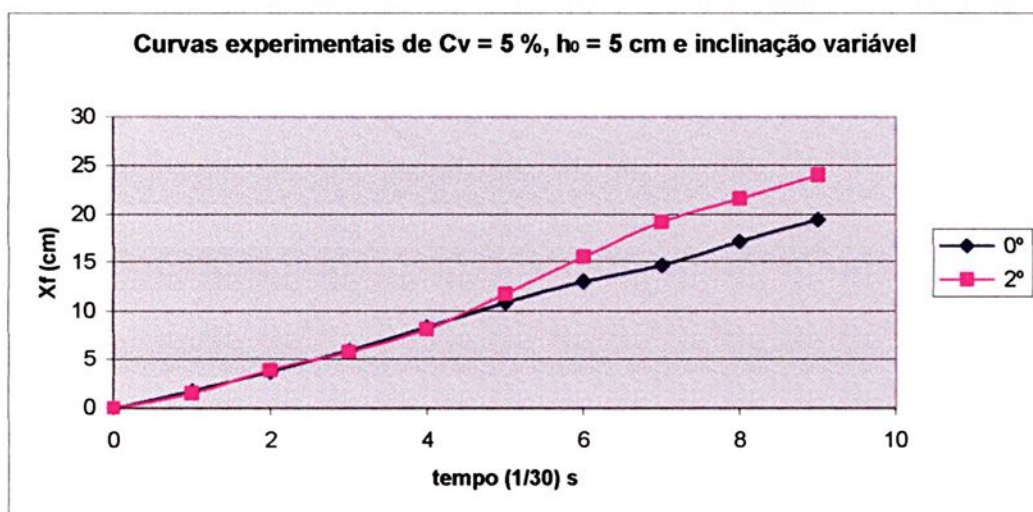


Figura 52 - Evolução temporo-espaçial das curvas experimentais com inclinação variável.

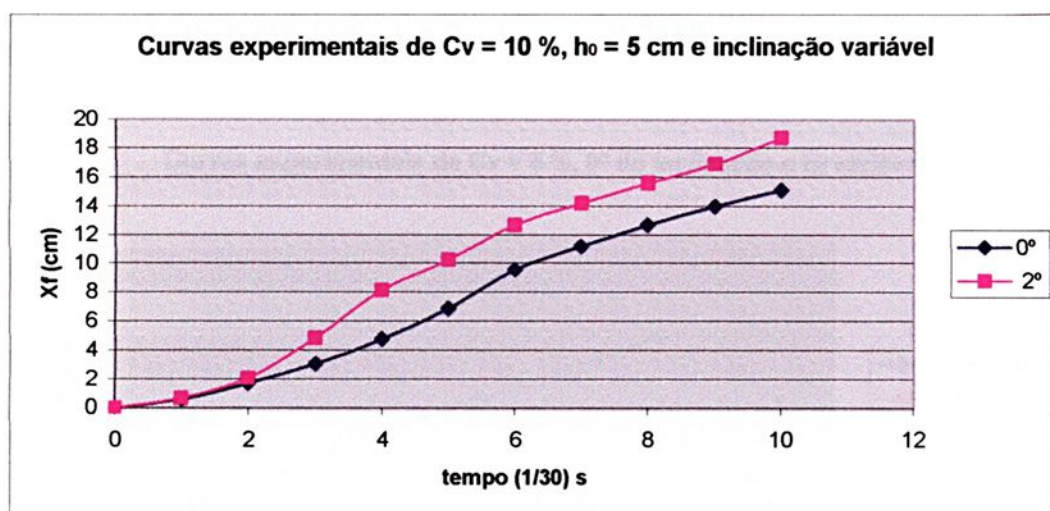


Figura 53 - Evolução temporo-espaçial das curvas experimentais com inclinação variável.

Na comparação entre as curvas experimentais da evolução da frente de onda em função do tempo para inclinações do canaleta de 0° e 2° e concentração de 5%, verificou-se uma região onde há praticamente uma sobreposição das curvas, onde, de acordo com Nsom et. al. (2000) e Debiane (2000), tem-se a região predominantemente de regime inercial. Depois dessa região, há um distanciamento entre as curvas, sendo que para maior inclinação os valores de X_f foram maiores como esperado.

Para as curvas experimentais com 10% de concentração, nota-se que a região dita inercial diminuiu.

→ Série 6:

→ Concentração Cv e inclinação fixas

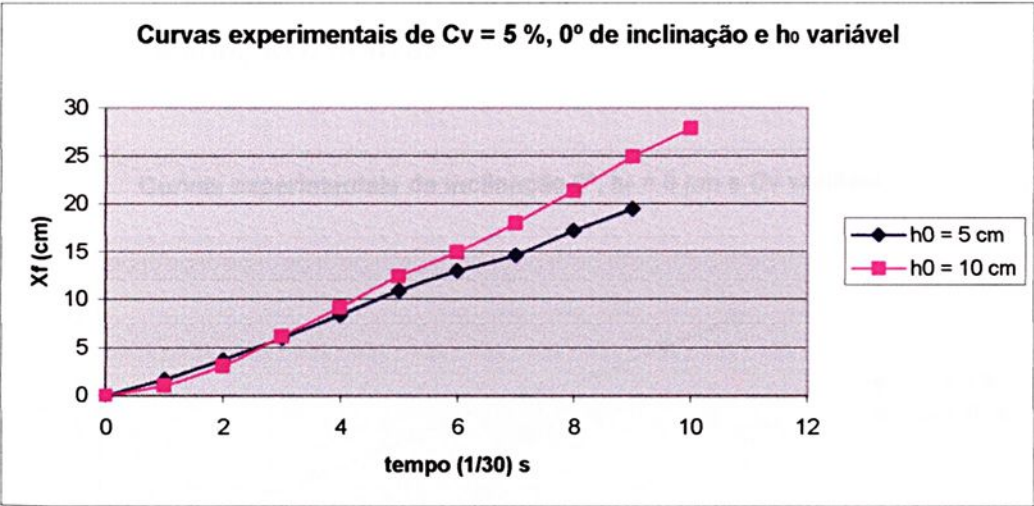


Figura 54 - Evolução temporo-espaçial das curvas experimentais com h₀ variável.

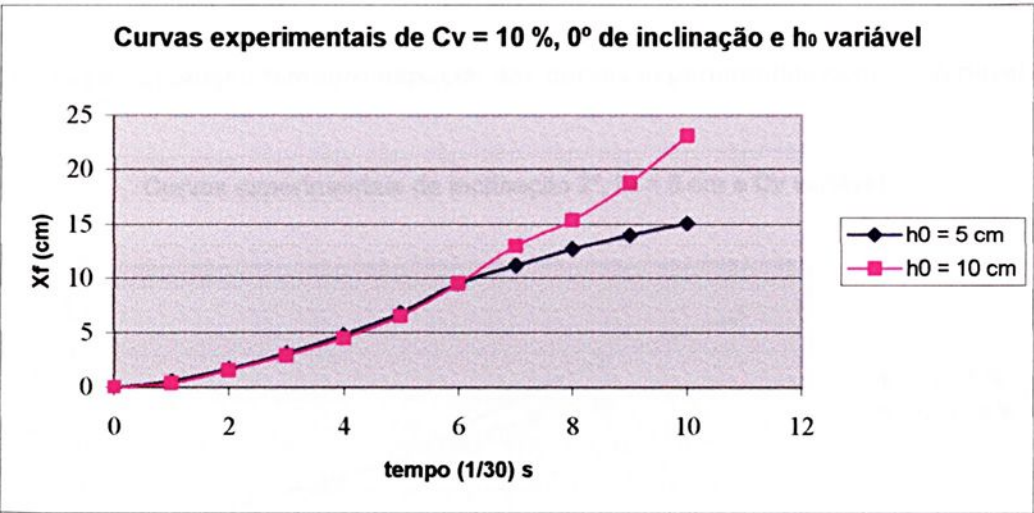


Figura 55 - Evolução temporo-espaçial das curvas experimentais com h₀ variável.

Da mesma forma que na série 5, existe uma certa região na qual onde as curvas sobrepõem-se e, depois se distanciam, está região é a chamada inercial, na qual Debiante (2000) diz que é uma região de elevadas velocidades e de difícil visualização com a filmadora digital JVC (GY DV 500), sendo este um dos motivos pelos quais para tempos pequenos as curvas não delineiem tendências diferentes



uma das outras. Também se verificou que para maiores valores da altura inicial no reservatório, mais rápida é a evolução da frente de lama.

→ **Série 7:**

→ **Inclinação e h_0 fixas**

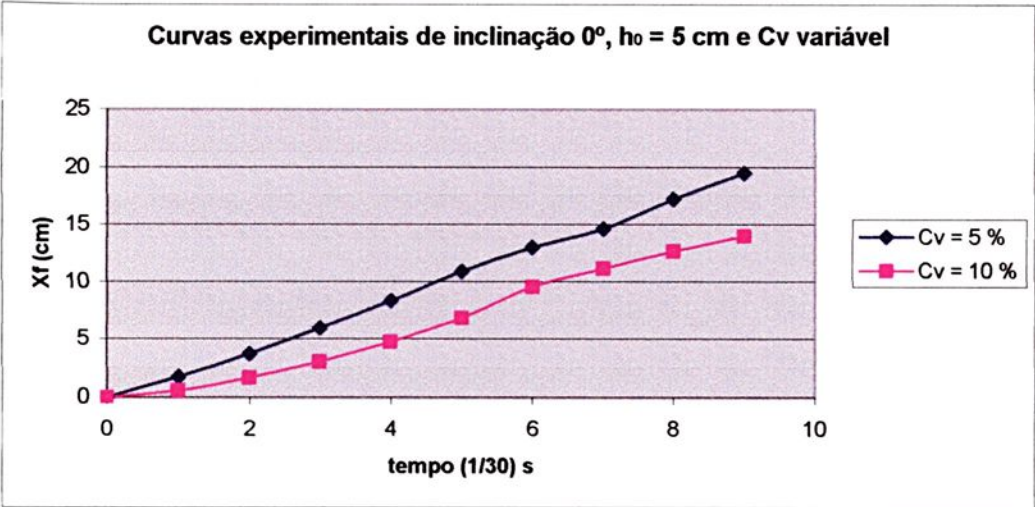


Figura 56 - Evolução temporo-espaial das curvas experimentais com C_v variável.

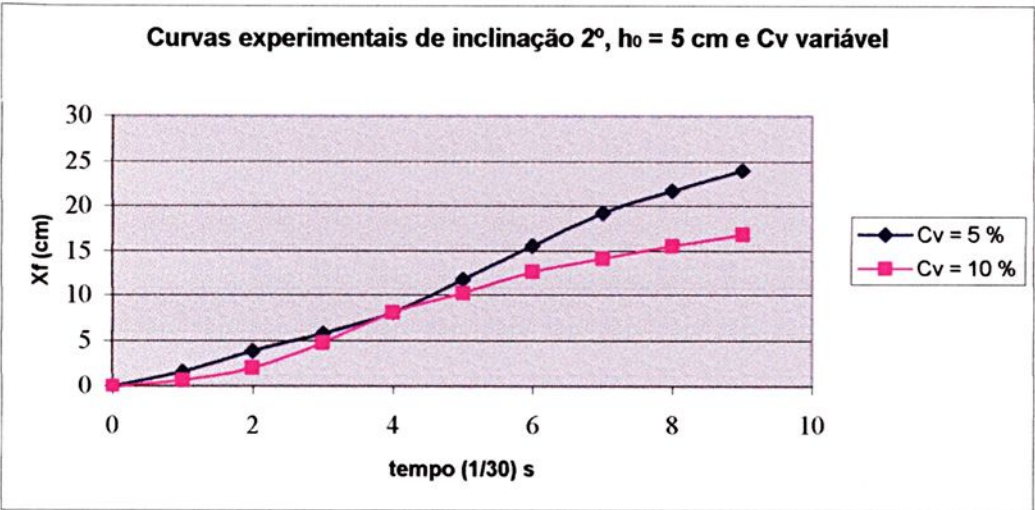


Figura 57 - Evolução temporo-espaial das curvas experimentais com C_v variável.

Nesta série, em geral, para baixas concentrações da mistura água + argila caulinítica, maiores são os valores da posição da frente de onda (menor efeito de resistência viscosa), fato que parece ser menos representativo com o aumento da



inclinação no fundo do canaleta, principalmente para tempos bastante pequenos ($t \rightarrow 0$) (regime inercial), pois no regime viscoso, para fluido visco-plásticos, há tendências das curvas terem um comportamento assintótico.



VI DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 - Da reologia do material ensaiado

Pesquisas bibliográficas indicam que os parâmetros do modelo reológico de Herschel-Bulkley seguem, via de regra, para argilas cauliníticas, o seguinte padrão: os valores de τ_c (tensão crítica) e k_m (índice de consistência) aumentam exponencialmente com a concentração em volume de sólidos da mistura. Em contrapartida, o valor de m (índice de escoamento) diminui com a concentração, obedecendo a uma função tipo potência. Trabalhos recentes na equipe de pesquisa (Lledo dos Santos (2003), Kiryu (2003)) têm comprovado e estendido os domínios de validade do modelo reológico proposto.

6.2 - Influência da concentração para mistura água + argila caulinítica

Como se pode notar na Figura 26, a variação da concentração em volume influencia de forma acentuada na curva de escoamento das misturas, o que vai ao encontro da teoria.

6.3 - Análise da variação do pH

Pôde-se observar a partir dos resultados obtidos (Figuras 24 e 25), conforme Lledo dos Santos (2003), que a influência do pH na curva de tensão x deformação é pequena, no entanto, um pouco mais significativa que a influência da temperatura, mas praticamente desprezível para o caso tratado nesta dissertação.

6.4 - Análise da variação da temperatura

Tendo em vista os resultados das Figuras 31 e 32, conforme Lledo dos Santos (2003), verifica-se não haver maiores problemas para o bom controle da temperatura no momento da realização do ensaio de reometria, ou mesmo, quando se tenta manter a temperatura da amostra igual a do escoamento da mistura no canaleta.

6.5 - Dos ensaios de ruptura com material visco-plástico (análise da mistura água + argila caulinítica)

6.5.1 - Canaleta 1

Para os ensaios com 5% de concentração e com inclinações de 0° e 2°, nota-se que o perfil de velocidade da frente (V_f) x tempo tem uma primeira fase na qual ela ganha velocidade, uma segunda onde ela perde velocidade e uma parte final na qual ela volta a ganhar velocidade. Isto é explicado pelo fato da mistura ter uma característica quase Newtoniana associada, sobretudo, com o efeito de reflexão de pequenas ondas no limite montante do reservatório, observadas quando da realização dos ensaios de ruptura.

Já para o perfil da distância percorrida pela frente X_f x tempo, percebe-se um distanciamento das curvas teóricas (dadas por Ritter (1892) e Piau (1995) nas equações (5.6) e (5.7), respectivamente) e as experimentais, pois, mesmo que seja pequena a resistência imposta pelo fundo e lateral do canal (discutível), ela existe e não se sabe o quanto essa interfere nos resultados. As curvas teóricas de Ritter (1892) e Piau (1995) foram quase coincidentes, mesmo Piau (1995) considerando uma tensão inicial de cisalhamento (pequena para uma concentração de 5%).

Já para as misturas com concentração de 12 % e 20 % foi observado que o perfil de velocidade da frente de onda V_f x tempo, também tem algumas fases, sendo que na primeira há um ganho de velocidade, já na fase intermediária há uma oscilação na velocidade e na fase final a velocidade diminui tendendo a zero. Este fato já era esperado, pois com o aumento do C_v , a mistura passa a apresentar



características visco-plásticas, ou seja, passa a apresentar tensão crítica de cisalhamento e há também um aumento na resistência viscosa.

Para essas concentrações, o perfil da distância percorrida pela frente da onda $X_f \times$ tempo (ensaios) começa a apresentar tendências compatíveis com os resultados da proposta de modelagem.

6.5.2 - Canaleta 2

De acordo com a Figura 49, verifica-se que a evolução da frente de onda é praticamente linear, e isto implica em dizer que a reologia da mistura é, “praticamente Newtoniana”, sendo então, as justificativas para o distanciamento entre as curvas teórica e experimental, as mesmas que para o canaleta 1. Ou ainda o efeito de τ_c é bem reduzido.

Já na Figura 50 e 51, o aumento da concentração faz com que a característica linear da evolução da frente de onda diminua, ou seja, a mistura começa a apresentar forte característica de fluido visco-plástico (presença de tensão crítica de escoamento considerável), e também se nota a presença de dois regimes, um predominantemente inercial e um segundo predominantemente viscoso, conforme consideração de Nsom et. al. (2000) e Debiante (2000), trabalhando respectivamente com fluido viscoso (solução de água + glucose) e visco-plástico (Carbopol) e com recursos de visualização possibilitando obter até 1000 imagens por segundo. Resultados estes não quantificados nessa dissertação.

Nas Figuras 52 e 53, estudou-se a influência da inclinação do fundo do canaleta, na evolução da frente de onda, para a mistura água + argila caulinita com concentrações de 5% e 10%. Notou-se que para a menor concentração, as curvas sobrepõem-se por mais tempo que as de 10%, e isto nos permite dizer que a inclinação de fundo tem maior influência para misturas mais concentradas. Confirmou-se também, que para maiores inclinações, independente da concentração, as velocidades são maiores.

As Figuras 54 e 55 mostram que para maiores alturas iniciais no reservatório (h_0), obtêm-se valores mais elevados de velocidade.

Sob as mesmas condições de contorno, para os ensaios de ruptura de barragem, as misturas mais concentradas, via de regra, mostraram campos de



velocidades ($V_f = \frac{dX_f(t)}{dt}$) inferiores às menos concentradas, conforme ilustrado nas Figuras 56 e 57.

6.5.3 – Da influência da tensão reduzida τ_c/ρ

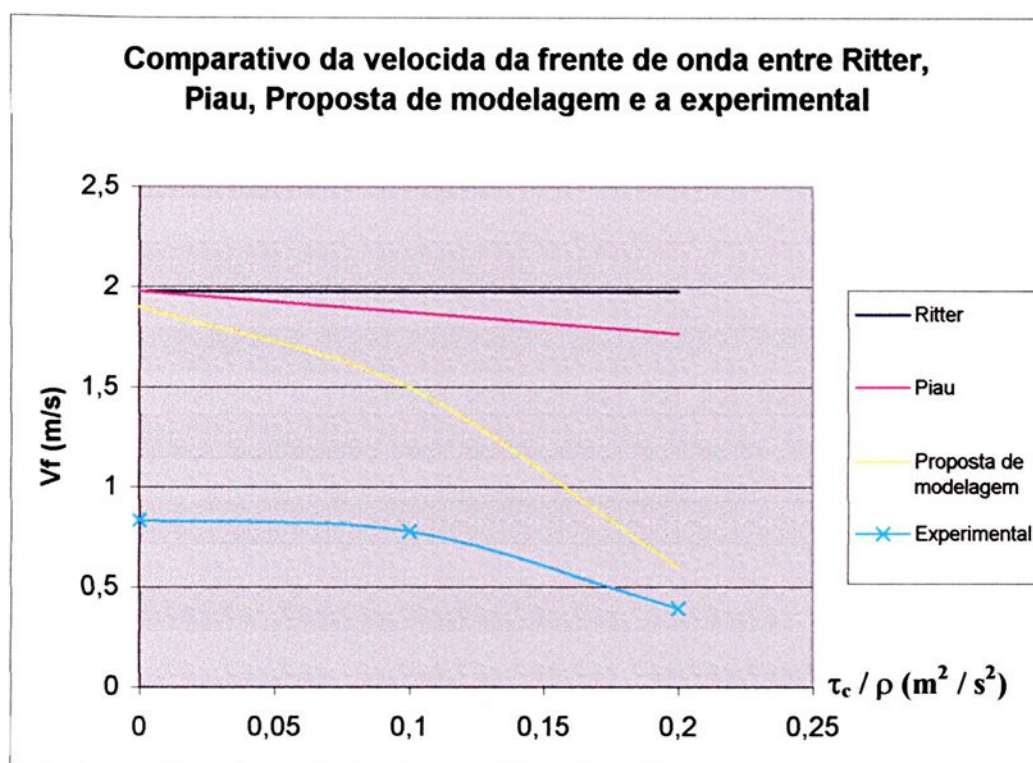


Figura 58 - Velocidade da frente de onda teórica de Ritter (1982), Piau (1995), proposta de modelagem teórica e experimental.

A partir de uma análise global das velocidades ($V_f = dX_f/dt$) das frentes obtidas dos ensaios dinâmicos (Figuras 37, 39, 41 e 43), estimou-se em média, uma velocidade da ordem de 1,00 m/s, valor este distante tanto da proposta idealizada de Ritter (1892), quanto da primeira aproximação de Piau (1995). Para as Figuras 45 e 47, verificou-se um distanciamento ainda maior das velocidades das frentes experimentais a partir dos ensaios dinâmicos, daquelas propostas por Ritter (1892) e por Piau (1995), ficando da ordem de 0,50 m/s.

Com a solução funcional obtida pela resolução da equação (4.30), verificou-se que a mesma fornece resultados razoáveis. Verificou-se a possibilidade de antever a

influência dos parâmetros geométricos físicos e reológicos envolvidos na lei de evolução de frente de lama (h_0 , τ_c e ρ da mistura).

Ademais, a lei de evolução proposta apontou para resultados bastante razoáveis quando comparados com os resultados experimentais. Observa-se, por exemplo, uma tendência do modelo para valores de velocidades da frente da ordem de grandeza dos valores experimentais, principalmente para concentrações em volume superiores a 10%.



VII CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

- **Conclusões**

Dentre as considerações e conclusões que esta proposta permite apontar, é oportuno citar:

- Misturas de água + argila caulinítica, de natureza visco-plástica, podem bem representar o material encontrado no pé das barragens. Tais composições ajustam-se bem ao modelo reológico de Herschel-Bulkley à medida que cresce a fração de argila na mistura;
- Essas misturas, quando ensaiadas nos canaletes, geram ondas de ruptura de frentes hiperconcentradas pronunciadas, seguida de concavidade voltada para cima fato este, talvez, atribuído à retenção de material junto à comporta e/ou efeito de borda;
- Tais misturas conferem frentes de lama que se propagam com velocidades ordens de vezes inferiores à proposta de Ritter (1892) (fluido invíscido e predominantemente turbulento), porém com frentes (alturas) ordens de vezes superiores às misturas Newtonianas;
- O modelo de velocidade de propagação da frente depende basicamente da tensão crítica de cisalhamento, massa específica da mistura, índice de consistência de Herschel-Bulkley, altura inicial no reservatório, gravidade e do índice de escoamento;

- Quanto à existência e determinação dos domínios de validade do regime inercial, o primeiro regime viscoso e segundo regime viscoso, o aparato experimental mostrou-se inadequado, sobretudo pela limitação de 30 quadros por segundo, uma vez que se trabalha com transientes da ordem de décimos de segundos. Esses resultados são citados na dissertação, mas devem ser tomados com bastante reserva. Na verdade eles advêm do trabalho de Debiante (2000), que utilizou misturas de Carbopol e pôde usufruir de câmera ultra-rápida com capacidade de captura de 1000 imagens por segundo.

- **Perspectivas Futuras**

- Aumentar o número de ensaios de maneira a se investigar mais detalhadamente evolução das frentes;
- Implementar cadeia de medição para se controlar, de maneira mais afinada, a evolução da frente da onda e níveis (profundidade);
- Realizar ensaios com material transparente, de maneira a se visualizar e controlar níveis de esvaziamento do reservatório, visando maior controle da conservação da massa. Neste item o Carbopol utilizado por Debiante (2000) poderá ser uma solução, ainda que se trate de material de difícil trabalhabilidade;
- Investigar, via numérica, a solução da equação (4.30);
- E, por fim, estender a confrontação dos resultados experimentais com a proposta teórica dessa dissertação, assim como com àquelas apontadas em trabalhos de Debiante (2000), Nsom et. al. (2000), etc.



VIII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEBIANE, K., "Hydraulique des Écoulements Laminaires à Surface Libre dans un Canal pour des Milieux Visqueux ou Viscoplastiques", Doctorat de L'Université Joseph Fourier-Grenoble I, Les cahiers de Rhéologie, 2000.

DRESSLER, R. F., (1952) "Hydraulic resistance effect upon the dam break function", Journal of Research, National Bureau of Standards, 49, nº 3, pp. 217 – 225.

HUNT, B., (1982) "Asymptotic solution of dam break problem" – Journal of Hydraulic Division ASCE, pp. 115 – 126.

HUNT, B., (1982) "Dam Break Problem", Chapter 36 (Complex flow Phenomenon and Modelling) of Encyclopedia of Fluids Mechanics, Vol. 6, 1988, pp. 1448 – 1454.

KIRYU, H. S. (2003), "Da reologia das misturas água + argila, água + areia + argila ao entendimento e sistematização de uma dinâmica de escoamento de fluidos hiperconcentrados em conduto livre". 2º Relatório (Parcial) de Bolsa de Iniciação Científica – FAPESP/2003.

LLEDO DOS SANTOS, F., "Estudo Teórico – Experimental em Via de Determinação de uma Lei de Atrito em Escoamento de Fluidos Hiperconcentrados". Ilha Solteira, 2003. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP.



NOGUEIRA, J.B., "Mecânica dos Solos", Pub. 003 – Reimpressão – p 43-51,75-84, São Carlos, 1988.

NSOM B., DEBIANE K., PIAU J. M., "Bed slope effect on dam break problem", Journal of Hydraulic Research, Vol. 38, Numéro 6, pp. 459 – 464, 2000.

PANDOLFELLI, V. C. et al., "Dispersão e empacotamento de partículas". Fazenda Arte, São Paulo, 224 p, 2000.

PIAU, J. M., "Equations of Plastic Flow for Yield Stress Fluid in a Long Domain – Application to flow on an Inclined Plane", J. Rheology, 1995.

RITTER, A., (1892) – "The Propagation of Water Waves", Ver Deustsch Ingenieure Zeitschr, Berlin, 36, part 2, no 33, pp. 947-954.

SU. S. and BARNES, A. H. (1970), "Geometric and functional effects on sudden releases" – Journal of Hydraulics Division, ASCE, 96, nº 11, pp. 2185 – 2200.

WHITHAM, G. B. (1954) "The effect of hydraulic resistance in the dam break problem". Proc. Royal Society of London, Series A, 227, pp. 399 – 407.



IX – BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BARRÉ DE SAINT-VENANT, 1871. Théorie du mouvement non permanent des eaux, Institut de France, Académie des sciences, Comptes rendus, Paris Juillet 1871, vol 73, p 147-237.

BAGNOLD, R.A. "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under sheer, Proc. Roy. Soc. London, Series A, 225, pp 49-63, 1954.

BELL S. W., ELLIOT R. C., CHAUDHRY M. H., "Experimental results of two-dimensional dam break flows", Journal of Hydraulic Research, Vol. 30, Numéro 2, pp. 225 – 252, 1992.

BINGHAM, E. C., "Fluidity and Plasticity", McGraw-Hill, New York, 1992.

BORGES, A.L.O., TARQUI, J.L.Z., "Determinação das Propriedades Reológicas de Sedimentos Finos em Suspensão Obtidos de Três Tipos de Solos do Estado do Rio Grande do Sul do Brasil". CD ROM do IV Silusba - Coimbra-Portugal, 1999.

BUFFARD T., GALLOVET T., HERARD J. M., "Un schéma simple pour les équations de Saint-Venant", Comptes rendus de l'Académie des Sciences. Série 1, Mathématique, Vol. 326, Numéro 3, pp. 385 – 390, 1998.

CHEN. C.-L. "Generalized viscoplastic modeling of debris flow." Journ. Hydr. Div., ASCE 114, p 237-258, 1988.

"Estudo Teórico-Experimental para a Determinação da Velocidade de Frentes de Lama Escoando em Canais"



CHEN. C.-L. "General solution for viscoplastic debris flow." Journ. Hydr. Div., ASCE 114, p 259-282, 1988.

CLERICI, A.; PEREGO, S. "Simulation of the Parma River blockage by the Corniglio landslide (Northern Italy)", Geomorphology, Vol. 33, Issue 1-2, May, 2000, pp. 1-23.

COUSSOT, P., PIAU J. M., "On the behavior of mud suspensions". Rheologica Acta, Vol. 33, N° 3, p 175-184, 1994.

COUSSOT, P., PROUST, S., ANCEY, C., "Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids". J. Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 66 - p 55-70, 1996.

COUSSOT, P., LAIGLE, D., ARATTANO, M., DEGANUTTI, A., MARCHI, L., "Direct determination of rheological characteristics of debris flow". Journal of Hydraulic Engineering - ASCE 124: (8), p 865-868, 1998.

ELLIOT R. C., CHAUDHRY M H., "A wave propagation model for two-dimensional dam break flows", Journal of Hydraulic Research, Vol. 30, Numéro 4, pp. 467 – 483, 1992.

FEDERICO, V.D., "Free-surface flow of hyperconcentrations". Fluid Dynamics Research, Vol 24, p 23-26, 1999.

FREITAS MACIEL, G., VILA, J.P., MARTINET, G. "Roll wave formation in the non Newtonian flows" - XIV COBEM. Bauru, S.P., Brasil. 1997.

GARCIA-NAVARRO P., FRAS A., VILLANUEVA I., "Dam break flow simulation: some results for one-dimensional models of real cases", Journal of Hydrology Vol. 216, Issue 3 – 4, March 22, 1999, pp. 227 – 247.



HOANG QUOC ON, TRAN GIA LICH, "Écoulement en rivière après une rupture de barrage", Vol. 45, Numéro 6, p. 443 – 440, 1990.

HUANG, X., GARCIA, M.H., "A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope". J. Fluid Mech., Vol. 374, p 305-333, 1998.

HUTTER, K., SAVAGE, S.B., "-Discussion on law of resistance of hyperconcentration flow in open channel", Scientia Sinica Vol. 25, pp 1332-1342, 1982.

LAUBER G., HAGER W. H., "Experiments to dam break wave: sloping channel", Journal of Hydraulic Research, Vol. 36, Numéro 5, pp. 761 – 773, 1998.

LAUBER G., HAGER W. H., "Experiments to dam break wave: horizontal channel", Journal of Hydraulic Research, Vol. 36, Numéro 3, pp. 291 – 307, 1998.

LEBRETON A., "Prévision des risques dus aux barrages", Urgences Médicales, Vol. 16, Numéro 3, pp. 108 – 113.

LI, G.; WEI, H.; HAN, Y.; CHEN, Y., "Sedimentation in the Yellow River delta, part I: flow and suspended sediment structure in the upper distributary and the estuary". Marine Geology, Vol. 149, Issue: 1-4, pp. 93-111, 1998.

MARCHE C., LESSARD G., LEMAIRE S., BOCHARD B., "Rupture de barrage et cartographie des inondations, une analyse assistée par ordinateur", Canadian Journal of civil engineering, Vol. 17, Numéro 2, pp. 218 – 225, 1990.

O'BRIEN, J.S., JULIEN, P.Y., "Laboratory analysis of mudflows properties.", J. Hydr. Eng., ASCE 114 (8), p 877-887, 1988.



PAQUIER A., ROBIN O., "Une méthode simple pour le calcul des ondes de rupture de barrage", Houille Blanche (Grenoble), Vol. 50, Numéro 8, pp. 29 – 34, 1995.

PIAU, J.M., "Flow of a yield stress fluid in a long domain, application to flow on an inclined plane". J. Rheology, Vol. 40, p 711-723, 1996.

PIROTON M., "Calcul de la propagation d'une onde de rupture de barrage", Tribune de l'eau (la), Vol. 551, Numéro 6, p. 23 – 31, 1991.

SAVIC L. J., HOLLY F. M. JR., "Dam break flood waves computed by modified Godunov Method", Journal of Hydraulic Research, Vol. 31, Numéro 2, pp. 187 – 204, 1993.

SU, S., (1977), "Unsteady flow analysis of dam break waves". Proc. Dam Break Routing Model Workshop Bethesda, Maryland, pp. 15 – 46.

TINGSANCHALI, T., CHINNARASRI, C., "Numerical modelling of dam failure due to flow overtopping", Hydrological Sciences Journal, Vol. 46, Numéro 1, p. 113 – 130, 2001.

WAN, Z. "Bed material movement in hyperconcentrated flow". Ser. Pap. 31 Inst. of Hydrodyn. and Hydraul., Tech. Univ. of Denmark, Lyngby, 1982.

ZERROUK, N. E., MARCHE, C., "Les prévisions des brèches de rupture des barrages en terre restent difficiles", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28, Numéro 51, pp. 120 – 132, 2001.

ZOPPOU, C.; ROBERTS, S. "Numerical solution of the two-dimensional unsteady dam break", Applied Mathematical Modelling Vol. 24, Issue 7, June, 2000, pp. 457-475.





UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dec.feis.unesp.br

