UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INVESTIGAÇÃO REOLÓGICA E ANÁLISE MECÂNICA DE COMPÓSITOS NÃO-NEWTONIANOS

HAMILTON DOS SANTOS KIRYU

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica – Ênfase em Ciências Térmicas.

ORIENTADOR : PROF. DR. GERALDO DE FREITAS MACIEL

ILHA SOLTEIRA - SP
- Novembro 2006 -

“Um simples fato, como o bater de asas de uma borboleta em Pekin, pode influenciar em grandes eventos como a formação de um tufão na Flórida - Teoria do Caos.”

Eduard Norton Lorenz

DEDICATÓRIA

Dedico esta Dissertação de Mestrado a *Deus* pelas vitórias por cada um dos infindáveis obstáculos e desafios que encontrei e pela coragem e ânimo necessários para enfrentá-los.

Também dedico aos meus pais, *Celestino Rioiti Kiryu* e *Maria Aparecida dos Santos Kiryu*, pelo apoio de todas as formas possíveis e necessárias a uma longa e árdua jornada como a que trilhei. Aos meus irmãos, *Andressa* e *Shigueo* pelo carinho.

E à *Joseane de Aguiar* por ter batalhado comigo durante essa importante fase da minha vida e, com amor, ter me ajudado a chegar ao fim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Geraldo de Freitas Maciel pela orientação e paciência necessárias para concluir esta Dissertação de Mestrado.

A toda equipe técnica, em especial ao Cléber Fábio Batista e demais colegas do mestrado, André, Joel, Fabiana, Adriana e Roberta, orientados pelo professor Geraldo.

Aos meus amigos, José, Jonatas, Tarso, Rodrigo e Luciano, com os quais convivi durante toda a minha vida acadêmica.

À Joseane de aguiar.

À FAPESP pelo financiamento de bolsa de estudo.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS I

LISTA DE FIGURAS VI

LISTA DE TABELAS XIV

RESUMO XVI

ABSTRACT XVII

PREÂMBULO 18

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO 22

CAPÍTULO II - ESTADO DA ARTE 26

II.1 - Misturas compostas de água+argila+detritos 27

II.1.1 - Propriedades das partículas 29

II.1.1.1 - Movimentação Browniana 29

II.1.1.2 - Sedimentação 30

II.1.2 - Propriedades físicas de suspensões 34

II.1.2.1 - Interação entre partículas esféricas imersas em um fluido não-newtoniano 34

II.1.2.1.1 - Considerações gerais sobre interações hidrodinâmicas 34

II.2.2.1.2 - Contato direto entre as partículas 35

II.1.2.1.3 - Interações entre grãos em uma mistura de água+argila 36

II.1.2.1.4 - Interações no interior de uma suspensão de lama 37

II.1.3 - Forças em suspensões lamosas 38

II.1.3.1 - Corpos imersos em um fluido não-newtoniano homogêneo 38

III.1.3.1.1 - Força estática crítica anterior ao movimento 38

II.1.3.1.2 - Campo de escoamento ao redor de uma esfera 40

II.1.3.1.3 - Força de arrasto 42

II.1.4 - Efeitos de inércia 43

II.1.4.1 - Modelo de Bagnold 45

II.1.4.1.1 - Estudos experimentais de Bagnold 46

II.1.4.2 - Estudos de efeitos de inércia para fluidos intersticiais não-newtonianos 49

II.1.4.3 - Efeito da distribuição granulométrica sobre as propriedades macroscópicas de uma suspensão concentrada 53

II.1.4.3.1 - Variação da tensão crítica com a concentração sólida 55

II.1.4.4 - Propriedades reológicas em função da granulometria 59

II.2 - Escoamento com superfície livre de misturas concentradas 62

II.2.1 - Teoria de Bagnold 63

II.2.1.1 - Escoamento para o regime inercial de grãos 63

II.2.1.2 - Regime macro-viscoso 65

II.2.2 - Escoamento de um fluido hiperconcentrado sobre um plano inclinado 66

III.2.2.1 - Modelagem matemática para escoamento de superfície livre de fluidos hiperconcentrados 68

II.2.3 - Dinâmica do escoamento de misturas 69

II.2.3.1 - Escoamento uniforme para fluido de propriedades não-newtonianas 69

II.2.3.2 - Cálculo de q: vazão por unidade de largura do canal 72

II.2.3.3 - Determinação simplificada de uma lei de atrito para canal 72

CAPÍTULO III - OBJETIVOS 74

CAPÍTULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS 75

IV.1 - Materiais utilizados 75

IV.1.1 - Argila 75

IV.1.2 - Areia 76

IV.1.3 - Carbopol 76

IV.1.4 - Equipamentos 77

IV.1.4.1 - Reômetro 77

IV.1.4.2 - "*Spindles*" 78

IV.1.4.3 - Banho térmico 78

IV.1.4.4 - pH-metro 80

IV.1.4.5 - Canal e conjunto moto-bomba 80

IV.1.4.6 - Equipamentos auxiliares 83

IV.2 - Metodologia utilizada 84

IV.2.1 - Determinação das incertezas experimentais 85

CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES 91

V.1 - Parte 1 91

V.1.1 - Ensaios de tixotropia 91

V.1.1.1 - Ensaios de pista de carregamento constantes com pistas de repouso 92

V.1.1.2 - Ensaios de pistas de carregamento e descarregamento graduais 96

V.1.2 - Análise da influência do modo de preparo da mistura 100

V.2 - Parte 2 103

V.2.1 - Análise dos efeitos de sedimentação e ressuspensão dos materiais inertes 103

V.2.1.1 - Séries de ensaios filmados 106

V.2.1.1.1 - Primeira série de ensaios filmados 107

V.2.1.1.2 - Segunda série de ensaios filmados 109

V.2.2 - Ensaios reométricos 115

V.2.2.1 - 1ª Bateria de ensaios 117

V.2.2.1.1 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 5% de argila – areia retida na peneira 60 118

V.2.2.1.2 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 10% de argila – areia retida na peneira 60 120

V.2.2.1.3 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 15% de argila – areia retida na peneira 60 124

V.2.2.1.4 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 20% de argila – areia retida na peneira 60 127

V.2.2.2 - 2ª Bateria de ensaios 129

V.2.2.2.1 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 5% de argila – areia retida na peneira 100 130

V.2.2.2.2 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 10% de argila – areia retida na peneira 100 133

V.2.2.2.3 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 15% de argila – areia retida na peneira 100 136

V.2.2.2.4 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 20% de argila – areia retida na peneira 100 139

V.2.2.2.5 - Ensaios de pistas de carregamento constante – areia retida na peneira 100 142

V.3 - Parte 3 145

V.3.1 - Ensaios com misturas de água+argila+areia fina com mistura intersticial constante de C_v=15% 146

V.3.2 - Ensaios com misturas de água+argila+areia fina com concentração de sólidos totais constante de 20% 154

V.3.3 - Análise da influência dos parâmetros geométricos dos grãos no comportamento reológico das suspensões 161

V.4 - Parte 4 165

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES FINAIS 166

CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 169

ANEXO I - Conceitos Básicos 174

A I.1 - Fluido e tensão crítica 174

A I.2 - Viscosidade 174

A I.3 - Hipótese do meio contínuo 174

A I.3.1 - Princípios de conservação 175

A I.3.1.1 - Conservação da massa 175

A I.3.1.2 - Balanço da quantidade de movimento 176

A I.4 - Reologia 176

A I.4.1 - Reometria 176

A I.4.1 - Modelos reológicos 178

A I.4.2 - Viscosidade real e aparente 180

A I.4.3 - Visco-elasticidade 182

A I.4.4 - Tixotropia 184

ANEXO II - Escoamento em Superfície Livre 186

A II.1 - Ensaios de escoamento em superfície livre no canal piloto 186

A II.2 - Ensaios de escoamento em superfície livre no canal residente 192

A II.2.1 - Ensaios de escoamento em superfície livre com misturas de água+argila com adição de 5% de areia na mistura intersticial 194

A II.2.2 - Ensaios de escoamento em superfície livre com misturas de água+argila com adição de 10% de areia na mistura intersticial 197

A II.2.3 - Ensaios de escoamento em superfície livre com misturas de água+argila com adição de 15% de areia na mistura intersticial 201

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A_s Área superficial dos sólidos inertes

a_i Constante numérica

a_v Constante numérica

B Número de Bagnold

C_d Coeficiente de arrasto

C_v Concentração em volume de sólidos na mistura

$C_{Vinerte}$ Concentração em volume dos sólidos inertes no volume total da mistura

c: Velocidade relativa das duas partículas

D Coeficiente de difusividade do meio na direção x

d Diâmetro

E_A Erro do aparelho

E_E Erro experimental

E_T Erro total

F Força resultante

F_a Força total de arrasto

F_0 Força atuante sobre uma partícula solitária em um fluido infinito

f Coeficiente de atrito

$\mathbf{f}$ Força de contato

f_2 Força devida à componente tangencial da velocidade

f_1 Força devida à componente normal da velocidade

G Tensão adimensional

G^* Módulo visco-elástico

G' Módulo de conservação ou elástico

G'' Módulo de perda ou viscoso

g	Aceleração da gravidade
H_b	Número de Herschel-Bulkley
h	Profundidade total do escoamento
K_h	Constante numérica
k	Parâmetro de consistência do modelo de Herschel-Bulkley
k_1	Parâmetro de ajuste da lei de atrito em função da geometria do canal
k_2	Parâmetro de ajuste da lei de atrito em função da geometria do canal
m	Massa
N	Razão entre a força de gravidade e a resistência do líquido
n	Índice de escoamento do fluido
P	Tensão dispersiva ou pressão normal
R	Raio
Re_p	Número da Reynolds de partículas
r	Dimensão característica da partícula
S	Área da seção transversal
s	Função de resistência
t	Tempo
U	Velocidade adimensional
U_B	Velocidade de Bagnold
U_{Bs}	Velocidade superficial de Bagnold
$\overline{U}_B$	Velocidade média de Bagnold
u	Velocidade na direção x
$\overline{u}$	Velocidade média na direção x
V	Velocidade de queda da partícula
V_N	Componente normal da velocidade
V_T	Componente tangencial da velocidade

V_{st} Volume total dos sólidos da mistura

v Velocidade na direção y

$\bar{v}$ Velocidade média na direção y

$\overline{X}$ Valor médio da medida

Z Profundidade adimensional

Símbolos Gregos

β	Parâmetro de ajuste do modelo de Casson
γ_0	Amplitude máxima de deformação
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação
δ	Ângulo de defasagem entre o módulo elástico e o módulo viscoso
ε	Razão entre a distância das esferas e o raio das partículas
ζ	Distância média entre as superfícies das partículas
η	Viscosidade absoluta do fluido intersticial
η_i	Coeficiente de viscosidade modificado para o regime macro-viscoso
η_v	Coeficiente de viscosidade modificado para o regime inercial de grãos
θ	Declividade do canal
$\imath$	Comprimento característico de queda
κ	Constante de Boltzmann (1,38066 10^{-23} J/K)
μ	Viscosidade do fluido
μ_{ap}	Viscosidade aparente do material
μ_B	Viscosidade plástica de Bingham
μ_d	Viscosidade (dinâmica) do líquido intersticial
μ_{eq}	Viscosidade equivalente
μ_0	Viscosidade para taxas de deformação próximas a zero
μ_∞	Viscosidade para taxas de deformação elevadas
υ	Velocidade relativa da esfera em relação a velocidade do fluido
ξ	Fração relativa de pequenas esfera
Π	Coeficiente de resistência crítica (igual a π/4 para esse caso)
ρ_f	Massa específica do fluido intersticial
ρ_m	Massa específica da mistura

ρ_s Massa específica do grão

ρ' Massa específica submersa

ς Distância de separação entre duas partículas esféricas

σ Desvio-padrão

T Temperatura absoluta

τ Tensão de cisalhamento

τ_a Tensão cisalhante no fundo do canal

τ_c Tensão crítica de escoamento

τ_{ci} Tensão crítica da matriz fluida

τ_p Tensão de parede (tensão entre o fluido escoamento e o fundo do canal)

τ_0 Amplitude máxima de tensão

φ Diâmetro médio dos sólidos inertes

ϕ Concentração sólida da mistura

ϕ_{di} Ângulo dinâmico de atrito interno para o regime inercial de grãos

ϕ_{dv} Ângulo dinâmico de atrito interno na faixa macro-viscosa

ϕ_f Fração de sólidos finos

ϕ_g Fração de sólidos grossos

ϕ_t Fração total

ϕ_{max} Máxima concentração de empacotamento

ϕ_0 Concentração crítica de sedimentação

ϕ_∞ Concentração máxima para forte cisalhamento

χ Valor de correção de força de arrasto

Ψ Concentração linear

Ω Volume

ω Velocidade angular de rotação

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: a) Pasta de água/cimento - b) concreto fresco.....22

Figura 02: Curvas de comparação dos modelos reológicos de Herschel-Bulkley, Bingham e Newton, ajustados para os dados reais de água+argila.....24

Figura 03a: Escoamento de água, óleo, mel e lama respectivamente (Coussot, (1997) – Mudflow Rheology and Dynamics)…….....26

Figura 03: b) Escoamento de mistura água+argila (Laboratório de Hidrologia e Hidrometria – Unesp/Ilha Solteira) – c) Escoamento de lama e água com corante.....27

Figura 04: Aparência do campo de velocidades para uma partícula esférica caindo no interior de um fluido que possui tensão crítica (BERIS et al., 1985); "sphere motion" – sentido de movimentação da esfera, "rigid regions" – região que se comporta como um sólido; "Sheared region" – região cisalhada e "Yield surface" – superfície crítica.....41

Figura 05: Esquema de princípio da célula de cisalhamento.....49

Figura 06: Estado inicial dentro da "Jaqueta" – antes de ser atingida a velocidade para a ressuspensão (Kiryu, 2003).....51

Figura 07: Estado final dentro da "Jaqueta" – após atingir a velocidade para ressuspensão (velocidade crítica) (Kiryu, 2003).....51

Figura 08: "Ponto de quebra" – ponto a partir do qual para uma mesma Deformação se requer uma maior Tensão.....52

Figura 09: Demonstração das fases de agitação de mistura água+areia (Kiryu, 2003).....53

Figura 10: Variação da tensão crítica com a concentração sólida. A suspensão de esfera era composta de esfera de 1 e 3 mm de diâmetro. A fração relativa de pequenas esfera é ξ. A concentração inicial de caulinita para as misturas caulinita+esferas era 25%.....58

Figura 11: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de misturas com $N < 1$ e $N > 1$.....61

Figura 12: Esquema com as características do escoamento e do canal: h1, h2, L, θ, λ e os eixos x, y e z.....67

Figura 13: Perfil de Velocidade característico na vertical para um Fluido tipo Hershel-Bulkley.....70

Figura 14: Perfil de velocidade característico para um Fluido tipo Herschel-Bulkley aplicadas as adimensionalizações.....71

Figura 15: Perfil de Velocidade para um Fluido tipo Herschel-Bulkley.....71

Figura 16: Aparato experimental instalado no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria – Unesp/Ilha Solteira.....77

Figura 17: "Spindles" utilizados.....78

Figura 18: Banho térmico.....79

Figura 19: pH-metro de bancada modelo mPA-210/mPA210P da Ação Científica Produtos para Laboratório LTDA.....80

Figura 20: Canal de acrílico e conjunto para variação de inclinação.....81

Figura 21: (a) - Conjunto bomba+reservatório; (b) - Conjunto canal+bomba+reservatório de armazenamento.....81

Figura 22a: Canal residente no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria da Unesp/Ilha Solteira.....82

Figura 22b: Inversor de freqüência.....83

Figura 22c: Conjunto moto-bomba utilizado para recirculação do fluido hipercondentrado.....83

Figura 23: (a) – Cronômetro para medição de vazão; (b) – Estufa para secagem de materiais; (c) – Jogo de peneiras ABNT e peneirador mecânico.....84

Figura 24: Zona de pontos caótica abaixo de 10 s^{-1}.....85

Figura 25: Determinação dos erros para 10 amostras com Cv=10%, apresentação da curva reológica do valor médio e da barra de erros com variação de ± 3%....87

Figura 26: Determinação dos erros para 10 amostras com Cv=15%, apresentação da curva reológica do valor médio e da barra de erros com variação de ± 3%....87

Figura 27: Determinação dos erros para 10 amostras com Cv=20%, apresentação da curva reológica do valor médio e da barra de erros com variação de ± 3%....88

Figura 28a: Ciclos com carregamento constante de 30 Pa com repouso de 120 segundos (Cv de 15%).....92

Figura 28b: Comportamento da deformação e viscosidade no tempo para ensaio de carregamento constante.....93

Figura 29a: Ciclos com carregamento constante de 30 e 20 Pa com repouso de 120 segundos (Cv de 15%).....93

Figura 29b: Comportamento da deformação e viscosidade no tempo para ensaio de carregamento constante.....94

Figura 30a: Ciclos com carregamento constante de 20 e 30 Pa com repouso de 120 segundos (Cv de 15%).....94

Figura 30b: Comportamento da deformação e viscosidade no tempo para ensaio de carregamento constante.....95

Figura 31a: Ciclos de carregamento (100 segundos) e descarregamento (100 segundos) gradual com (Cv de 15%).....96

Figura 31b: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação e viscosidade x deformação para ensaio de carregamento e descarregamento gradual.....97

Figura 32a: Ciclos de carregamento (100 segundos) e descarregamento (200 segundos) gradual com (Cv de 15%).....97

Figura 32b: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação e viscosidade x deformação para ensaio de carregamento e descarregamento gradual.....98

Figura 33a: Ciclos de carregamento (60 segundos) e descarregamento (60 segundos) consecutivos com Cv de 15%.....98

Figura 33b: Variação das curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação para cada ciclo de carregamento.....99

Figura 34: Influência do modo de preparo das misturas para Cv = 10%.....101

Figura 35: Influência do modo de preparo das misturas para Cv = 15%.....102

Figura 36: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação para o 1º e 2º ensaios para diferentes períodos de repouso - amostra de Cv = 15% com barra de erros de ± 3%.....102

Figura 37: Comparação das Curvas de tensão de cisalhamento x taxa de deformação para uma mesma amostra de Cv = 15% com diferentes tempos de repouso e barra de erros de ± 3%.....103

Figura 38: Série de figuras do primeiro ensaio com camisa transparente para análise de efeitos de ressuspensão e sedimentação – (a) início do ensaio – (b) total ressuspensão – (c) fim do ensaio.....108

Figura 39: Série de figuras do primeiro ensaio com camisa transparente para análise de efeitos de ressuspensão e sedimentação – distinção de um grupo de grãos em sedimentação após o fim do ensaio.....109

Figura 40: Série de figuras do segundo ensaio com camisa transparente para análise de efeitos de ressuspensão e sedimentação – (a) início do ensaio – (b) total ressuspensão – (c) fim do ensaio.....112

Figura 41: Sedimentação induzida de material granular suspenso após início de teste de cisalhamento simples.....113

Figura 42: (a) visualização das linhas de corrente - (b) fim do teste com material em suspensão.....114

Figura 43: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação das duas séries de ensaios filmados – mistura intersticial de água+carbopol.....115

Figura 44: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....118

Figura 45: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....119

Figura 46: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....119

Figura 47: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....120

Figura 48: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....123

Figura 49: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....123

Figura 50: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....124

Figura 51: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....124

Figura 52: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....125

Figura 53: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....126

Figura 54: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....126

Figura 55: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....127

Figura 56: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....128

Figura 57: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....128

Figura 58: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....129

Figura 59: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60.....129

Figura 60: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....131

Figura 61: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....132

Figura 62: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....132

Figura 63: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....133

Figura 64: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....134

Figura 65: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....135

Figura 66: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....135

Figura 67: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....136

Figura 68: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....137

Figura 69: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....138

Figura 70: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....138

Figura 71: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....139

Figura 72: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....140

Figura 73: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....141

Figura 74: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....141

Figura 75: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100.....142

Figura 76: Curvas de Viscosidade x Tempo de mistura intersticial de 5% de argila e pista constante de tensão aplicada a cada amostra – ensaio com areia retida na peneira 100.....143

Figura 77: Curvas de Viscosidade x Tempo de mistura intersticial de 10% de argila e pista constante de tensão aplicada a cada amostra – ensaio com areia retida na peneira 100.....143

Figura 78: Curvas de Viscosidade x Tempo de mistura intersticial de 15% de argila e pista constante de tensão aplicada a cada amostra – ensaio com areia retida na peneira 100.....144

Figura 79: Ábaco de Fração de areia x Tensão máxima aplicada para cada uma das amostras de água+argila – ensaio com areia retida na peneira 100.....144

Figura 80: Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com Cv =15% e adição de 5% de areia de várias granulometrias.....147

Figura 81: Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com Cv =15% e adição de 10% de areia de várias granulometrias.....147

Figura 82: Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com Cv =15% e adição de 15% de areia de várias granulometrias.....148

Figura 83: Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com Cv =15% e adição de 20% de areia de várias granulometrias.....148

Figura 84: Variação da tensão crítica em função da granulometria, adição de 5% de areia com barra de erros de ± 6,97%.....152

Figura 85: Variação da tensão crítica em função da granulometria, adição de 10% de areia com barra de erros de ± 6,97%.....152

Figura 86: Variação da tensão crítica em função da granulometria, adição de 15% de areia com barra de erros de ± 6,97%.....153

Figura 87: Variação da tensão crítica em função da granulometria, adição de 20% de areia com barra de erros de ± 6,97%.....153

Figura 88: Ensaios com concentração de sólidos totais de 20% - adição de areia retida na peneira 200.....155

Figura 89: Ensaios com concentração de sólidos totais de 20% - adição de areia retida na peneira 100.....156

Figura 90: Ensaios com concentração de sólidos totais de 20% - adição graduada.....156

Figura 91: Comparação das curvas com adição de 10% de areia nos sólidos totais.....158

Figura 92: Comparação das curvas com adição de 25% de areia nos sólidos totais.....158

Figura 93: Comparação das curvas com adição de 35% de areia nos sólidos totais.....159

Figura 94: Curva de ajuste para os dados de Tensão Crítica Adimensional x X.....163

Figura 95: Comparação entre dados de tensões críticas experimentais e estimados pela Equação 78.....163

Figura 96: Apresentação da variação da tensão crítica adimensional em função do diâmetro dos sólidos inertes e valores limites de índice de crescimento.....164

Figura 97: Comparação entre dados de tensão crítica de Ancey (2002) e Kiryu (2005).....164

Figura 98: Reograma de diferentes tipos de fluidos em regime permanente.....180

Figura 99: Variação da viscosidade da amostra (pasta de cimento MC 20) em função da taxa de deformação.....180

Figura 100: Variação da viscosidade em função da taxa de deformação para um fluido hiperconcentrado do tipo Herschel-Bulkley (viscosidades reais tan α1 e tan α2; viscosidades aparentes tan β1 e tan β2).....182

Figura 101: Transição do estado elástico para o estado viscoso (sentido da seta) passando pela transição viscoplástica.....183

Figura 102: Viscosidade complexa indicado pelo ponto de "cross"..... 184

Figura 103a: Ensaios de escoamento em superfície livre.....186

Figura 103b: Vistas superior e lateral de ensaios de escoamento em superfície livre.....187

Figura 104: Determinação da vazão de escoamento experimental.....187

Figura 105: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 1.....189

Figura 106: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 2.....190

Figura 107: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 3.....190

Figura 108: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 1 – 5% de areia.....196

Figura 109: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 2 – 5% de areia.....196

Figura 110: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 3 – 5% de areia.....197

Figura 111: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 1 – 10% de areia.....199

Figura 112: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 2 – 10% de areia.....200

Figura 113: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 3 – 10% de areia.....200

Figura 114: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 1 – 15% de areia.....202

Figura 115: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 2 – 15% de areia.....203

Figura 116: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 3 – 15% de areia.....203

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Importância relativa dos diferentes mecanismos de transferência de quantidade de movimento em um escoamento de uma mistura sólido+líquido 63

Tabela 2: Sistema de medição x "*spindles*" 78

Tabela 3: Faixas de temperaturas de operação de fluidos de controle de temperatura..... 79

Tabela 4: Valores utilizados na determinação dos desvios-padrão 88

Tabela 5: Apresentação dos valores médios e desvios-padrões para as amostras com concentração em volume de 10%..... 88

Tabela 6: Apresentação dos valores médios e desvios-padrões para as amostras com concentração em volume de 10%..... 89

Tabela 7: Apresentação dos valores médios e desvios-padrões para as amostras com concentração em volume de 10%..... 89

Tabela 8: Porcentagem de sólidos totais em relação ao volume total da mistura e porcentagem de finos com relação ao volume de sólidos totais 105

Tabela 9: Dados de fluidos intersticiais de água+argila 117

Tabela 10: Valores de N e comparação com ocorrências de sedimentação nos ensaios..... 117

Tabela 11: Valores de N e comparação com ocorrências de sedimentação nos ensaios..... 130

Tabela 12: Concentrações em volume de sólidos totais de cada mistura e fração de inertes nos sólidos totais 145

Tabela 13: Concentrações em volume das misturas intersticiais (água+argila) e fração de inertes nos sólidos totais 146

Tabela 14: Valores de *N* para diversos tamanhos de grãos 146

Tabela 15: Ajuste dos parâmetros reológicos ao modelo de Herschel-Bulkley 149

Tabela 16: Dados e valores de N para as misturas com concentração total de sólidos constante de 20% 154

Tabela 17: Ajuste dos parâmetros reológicos ao modelo de Herschel-Bulkley 155

Tabela 18: Tensões críticas para cada uma das adições e tipos de areia 157

Tabela 19: Valores dos ajustes dos reogramas ao modelo de Herschel-Bulkley 187

Tabela 20: Características das misturas ensaiadas no canal piloto..... 193

Tabela 21: Características reométricas das misturas ensaiadas..... 193

Tabela 22: Rotação de 480rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 194

Tabela 23: Rotação de 720rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 194

Tabela 24: Rotação de 960rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 195

Tabela 25: Rotação de 1160rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 195

Tabela 26: Rotação de 480rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 198

Tabela 27: Rotação de 720rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 198

Tabela 28: Rotação de 960rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 198

Tabela 29: Rotação de 1160rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 199

Tabela 30: Rotação de 480rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 201

Tabela 31: Rotação de 720rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 201

Tabela 32: Rotação de 960rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 201

Tabela 33: Rotação de 1160rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre 202

RESUMO

Esta dissertação de mestrado traz à discussão o comportamento reológico de misturas formadas por água+colóides+detritos (areia fina), visando entender e esclarecer os processos físicos e mecânicos, tais como sedimentação e ressuspensão de materiais inertes no seio da massa fluida não-newtoniana (água+colóides), bem como verificar a validade ou adeqüabilidade do modelo reológico de Herschel-Bulkley (modelo previamente investigado e validado para misturas compostas de água+colóides) para misturas viscoplásticas com presença de grãos. A variação das propriedades reológicas das misturas, em função das características físicas dos grãos (diâmetro, massa específica e área superficial), é investigada, e um modelo de estimativa de tensão crítica é apresentado. Ademais foram realizados ensaios preliminares de escoamento de fluidos hiperconcentrados em canais inclinados, na tentativa de calibrar uma lei de atrito.

Dentro dessas perspectivas, a dissertação é composta de 6 Capítulos com um denso Estado da Arte que descreve os fenômenos e mecanismos que regem os escoamentos desse tipo de compósito.

Com base na literatura estudada e, a partir da análise dos resultados experimentais, pôde-se concluir que, para misturas compostas de água+colóides+detritos, o comportamento reológico das misturas é o mesmo que aquele do fluido intersticial (água+colóides), desde que a homogeneidade da mistura seja garantida (não ocorrência de sedimentação e ressuspensão sucessivas). Neste caso, o modelo reológico de Herschel-Bulkley continua sendo válido para explicar as curvas de escoamento ou de fluxo das misturas viscoplásticas com grãos. Para misturas que apresentem os fenômenos de sedimentação e ressuspensão, o modelo de Bagnold, adaptado a fluidos hiperconcentrados, descreve bem as variações dos parâmetros reológicos em função das taxas de cisalhamento aplicadas.

Por fim, pôde-se concluir que os ensaios de superfície livre, ainda que parciais, podem constituir uma base metodológica consistente à determinação da lei de atrito de corridas de lamas e detritos em canais inclinados, conforme já previamente apontado em Lledo (2003) para misturas de água+argila.

Palavras-chave: Fluido não-Newtoniano, escoamentos de lama, sistemas particulados, Modelo reológico de Herschel-Bulkley, lei de atrito

ABSTRACT

This work retakes the discussion about the rheological behavior of mixtures composed by water+ kaolinitic clay+fine sand in order to investigate the physical and mechanical processes such as sedimentation and suspension of inert materials into the non-Newtonian or interstitial fluid (water+colloids), as well as verify the adaptability of the Herschel-Bulkley rheological model (model previously investigated and validated for composed mixtures of water+ kaolinitic clay) for explain the viscoplastic+coarse materials rheological properties. The variation of the rheological properties of the mixtures in function of the coarse material characteristics (diameter, specific mass and superficial area) was investigated and a model predicting yield stress was proposed. Furthermore, some tests were performed in an inclined canal to determine a friction law for this kind of fluids.

Inside of these perspectives, this dissertation is composed of 6 Chapters whit a dense State of the Art describing the phenomena and their mechanisms were pointed up.

Based on literature and from the experimental results, one could concluded that the viscoplastic + coarse material mixtures behavior is the same of the interstitial fluid one, since that the homogeneity of the mixture is guaranteed (not occurrence of successive sedimentation and resuspension). In this case, Herschel-Bulkley rheological model is still valid to explain the curves of flow of the viscoplastic + coarse material. For mixtures that present the phenomena of sedimentation and resuspension, Bagnold´s model, adapted to the hyperconcentrated fluids, describes well the variations of rheological parameters in function of the shear rates applied.

Finally, it could be concluded that the experiments of free surface in canals, despite partial, can constitute a consistent method to the determination of friction law of mud and debris flows flowing in inclined canals as already previously pointed in Lledo (2003) with respect to mixtures of water+kaolinitic clay (LLEDO, 2003).

Key-words: Non-Newtonian fluid, mudflows, particles system, Herschel-Bulkley rheological model, friction law

PREÂMBULO

Esta Dissertação de Mestrado é composta de seis capítulos e dois anexos, delineados da seguinte forma:

Capítulo I: Introdução

Nesta introdução são apresentadas as motivações da presente pesquisa, colocando em evidência os diferentes setores nos quais os resultados podem ser aplicados.

Capítulo II: Estado da Arte

O Capítulo II descreve um Estado da Arte bem estendido, mas que se mostrou necessário devido à complexidade dos diferentes fenômenos estudados e de suas interações. Em suma, tem-se:

- Comportamento de partículas sólidas dispersas em meio líquido;
- Processos de interação entre as partículas e de partículas e fluido;
- Processos hidrodinâmicos entre o fluido intersticial (água+colóides) e partículas granulares;
- Análise das variações das propriedades reológicas dos compostos em função da adição de material sólido nas misturas; e
- Estudos da dinâmica de escoamento de superfície livre de fluidos hiperconcentrados.

Capítulo III: Objetivos

O Capítulo III define os objetivos da pesquisa e os subitens a serem diagnosticados. O trabalho desenvolvido teve como objetivo principal a discussão sobre a validade do modelo reológico de Herschel-Bulkley para misturas compostas de água+argila+areia fina, assim como as leis de evolução dos diferentes parâmetros do respectivo modelo em função das variações das composições das misturas.

Capítulo IV: Materiais e Métodos

Nesse capítulo são descritos os materiais utilizados para a realização dos ensaios que são basicamente materiais sólidos inertes (areia fina) e coloidais (argila caulinítica e carbopol), solvente líquido (água). Quanto a equipamentos, utilizou-se o reômetro R/S, peneiras ABNT, pH-metro, canal em acrílico e canal residente, utilizados para os ensaios de superfície livre, bem como os conjuntos moto-bomba (bomba de 0,5 HP e de 7,5 HP) para cada uma das rampas. Também foram utilizados câmeras digitais e sistema avançado de captura de imagens.

Capítulo V: Resultados e Discussões

Este Capítulo discute os ensaios realizados, principalmente o mecanismo integrado da sedimentação e ressuspensão de material inerte, o que define o efeito monofásico ou bifásico das misturas ensaiadas. A partir dessas análises, a validade do modelo reológico de Herschel-Bulkley é discutida, bem como a variação dos parâmetros reológicos em função da granulometria dos inertes dentro do fluido intersticial (água+colóide).

Além disso, são discutidos os ensaios de escoamento de fluido hiperconcentrado (contendo material granular) em superfície livre na busca de uma lei de atrito em canal.

Capítulo VI: Discussões Finais

Este Capítulo retoma as grandes linhas desenvolvidas e argumentadas dentro da Dissertação, quais sejam: ênfase para a validade das zonas de comportamento descritas por Bagnold (1954) e redefinidas por Lledo (2003) para fluidos hiperconcentrados; a descrição dos mecanismos de sedimentação e ressuspensão, a validação do modelo reológico proposto para determinada faixa de trabalho (para fluidos homogêneos) e análise afinada sobre a variação do comportamento reológico de misturas em função de características dos inertes adicionados.

Também são discutidos os resultados referentes aos ensaios de superfície livre das misturas formadas de água+argila+areia fina.

Como comentário inicial pode-se citar que o comportamento reológico das misturas formadas de água+colóides+inertes tem o mesmo comportamento da mistura homogênea constituída de água+colóides (fluido intersticial), e a sedimentação do material inerte depende da tensão crítica do fluido intersticial. A granulometria dos sólidos inertes influencia no comportamento global das misturas, através da área superficial e do diâmetro dos grãos.

Com relação aos ensaios de superfície livre, para misturas formadas de água+argila+areia fina, foram observadas as mesmas tendências dos resultados de superfície livre com misturas de água+argila, quais sejam: grande dependência da condição de plano infinito (Lâmina/Largura do canal <<1) e grande influência da lâmina de escoamento na determinação da vazão e, por conseguinte, na calibração dos dados. Essa semelhança entre os dois tipos de mistura (água+argila+areia fina e água+argila) já era esperado, visto que o comportamento da mistura água+argila+areia fina, quando homogênea, também segue o modelo reológico de Herschel-Bulkley, conforme demonstrado e diagnosticado nesta Dissertação.

Referências Bibliográficas

Neste item é apresentada a bibliografia consultada, utilizada para a realização desta Dissertação.

ANEXOS

Anexo I - Conceitos Básicos:

No Anexo I são apresentados alguns conceitos que podem ser necessários ao entendimento do Estado da Arte e das análises arroladas neste documento. Em suma, tem-se:

- Definição de fluido e tensão crítica;
- Viscosidade;

- Hipóteses de meio contínuo, onde são discorridos os princípios de conservação da massa e quantidade de movimento;
- Conceitos de reologia trazendo à discussão ensaios de reometria, modelos reológicos, viscosidade real e aparente, visco-elasticidade e tixotropia.

Anexo II - Escoamento em Superfície Livre:

Neste anexo são apresentados resultados parciais sobre a lei de atrito em canais, determinados a partir de ensaios realizados em canal de acrílico e canal residente.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Em geral, fluidos oriundos de processos naturais e industriais apresentam um comportamento reológico diferente do proposto por Newton (comportamento dito newtoniano). Durante esses processos pode ocorrer a mistura de fluidos de características distintas ou a incorporação de materiais que se dispersam de forma diferente no interior do material fluido considerado "puro". Alguns exemplos de fluidos naturais são as lamas geradas durante enxurradas e deslizamento de encostas e as misturas de água+detritos geradas durante cheias urbanas. Além disso, podem ser dados como exemplos de fluidos não-newtonianos, envolvidos em processos industriais, as lamas asfálticas, o concreto fresco, alguns fluidos da indústria alimentícia (suco de laranja, maionese, etc).

(a) **(b)**

Figura 01: a) Pasta de água/cimento - b) concreto fresco

Dessa forma, o comportamento reológico destas misturas tornar-se-ia não mais newtoniano e, conseqüentemente, o parâmetro que caracteriza fluido newtoniano (índice de viscosidade) passaria a depender da taxa de cisalhamento ou da taxa de deformação.

Devido à infinidade de compostos que podem ser formados pela mistura de materiais, é fundamental o estudo do comportamento dessas misturas em função da natureza dos elementos base e das proporções nas quais esses elementos são misturados. Além disso, a falta de conhecimento das propriedades não-newtonianas dessas misturas dificulta a otimização de alguns processos industriais (como no caso do dimensionamento de bombas e projetos de obras - como canais e calhas para escoamento desses materiais).

É sabido que um fluido com uma pequena concentração de sedimentos permanece com propriedades newtonianas, podendo apresentar, entretanto, variação na sua viscosidade, que passa a depender dessa concentração. Com o aumento da concentração de sedimentos, a mistura deixa de se comportar como newtoniana, conferindo pois, propriedades não-newtonianas. Essa concentração passa a variar também com a granulometria e com a composição do mineral do sedimento, bem como com a qualidade da água (considerada como fluido newtoniano base).

Devido a essa problemática, podem ser encontrados na literatura processos normatizados que buscam, a partir de dados de laboratório ou de campo simples, identificar parâmetros reológicos que são utilizados para calibrar equipamentos. Exemplos desses processos são o teste de fluidez para injetabilidade de pastas de cimentos fresco e o ensaio de abatimento do cone de Abrams (“Slump Test”), no domínio da construção civil. Já na indústria alimentícia, por exemplo, é necessário estimar as taxas de deformação desenvolvidas dentro das tubulações nos processos de fabricação para garantir padrões de textura apreciados pelos consumidores.

Exposta a problemática que envolve fluidos desta natureza, surge o interesse em diagnosticar de maneira mais consistente, e com compromissos de engenharia, propriedades das misturas formadas pela matriz argilosa não-newtoniana acrescida de partículas inertes que, ou estão presentes em processos industriais, ou fazem parte de escoamentos naturais tais como cheias urbanas, corridas de lamas, que além de acarretarem prejuízos de bens e de infra-estrutura, causam, quase sempre, a perda de vidas humanas.

Com relação às misturas homogêneas ensaiadas no âmbito desta pesquisa utilizou-se água+argila e água+carbopol (polímero acrílico). Estas já passaram por algumas investigações de reometria, o permitiu admitir, a partir de estudos mais recentes tais como os de Coussot (1992, 1994), Piau (1996), Huang e Garcia (1998), LLedo (2003), Yabuschi (2004), que a caracterização reológica desses fluidos, no contexto aqui tratado, pode ser descrita por parâmetros do modelo reológico de Herschel-Bulkley, calibrado a partir de cisalhamento simples e em regime permanente. Tal constatação foi verificada e validada pelos ensaios reológicos realizados no contexto desta Dissertação de Mestrado.

Quanto à introdução de materiais inertes nos fluidos homogêneos, a literatura (ANCEY, 2002; BAGNOLD, 1954; KRIEGER e DOUGERTHY, 1959) já apontavam alguns indicativos na modificação do comportamento reológico dessas novas misturas.

Além disso, várias tentativas foram feitas na busca de melhor explicar a dinâmica global e intrínseca desses escoamentos nessa última década. Pode-se citar, a partir da literatura, desde as tentativas de modelagem a partir dos raros dados de campo, passando por séries de ensaios de laboratório, até chegar à modelagem numérica, onde diversas leis de comportamento reológico têm sido tratadas. Dentre essas tentativas, o modelo reológico de Bingham é o que mais figura na literatura. No entanto, com base em estudos dos últimos anos, tendo a experimentação física como base de decisão, verifica-se que todas essas suspensões de matriz argilosa e hiperconcentrada obedecem, de uma maneira geral, ao modelo reológico não-linear viscoplástico do tipo Herschel-Bulkley (CF. COUSSOT (1992, 1996, 1997), PIAU (1996), HUANG e GARCIA (1996)) para as quais uma proposta "Binghamiana" torna-se um caso particular, não obstante às vezes interessante e conveniente em certas aplicações da engenharia (MACIEL, 1997).

A Figura 02 indica o ajuste de uma curva de escoamento adaptada ao modelo de Bingham, Herschel-Bulkley e Newton. Nota-se claramente na Figura 02 a distância entre a proposta de Newton e os dados experimentais.

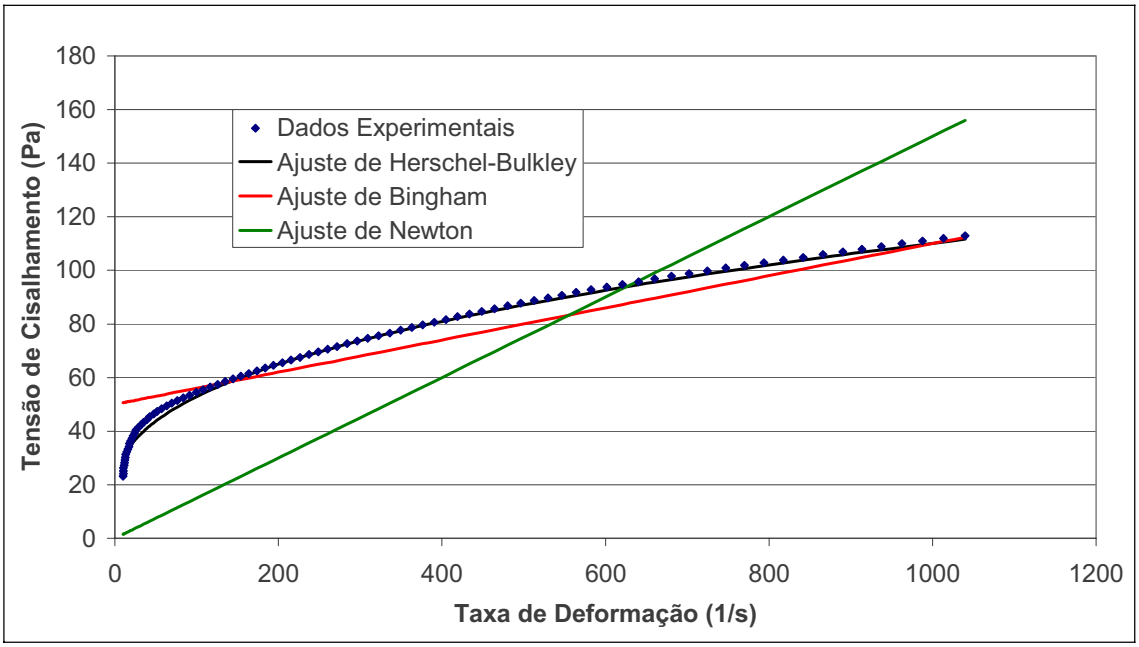


Figura 02: Curvas de comparação dos modelos reológicos de Herschel-Bulkley, Bingham e Newton, ajustados para os dados reais de água+argila – Unesp/Ilha Solteira.

No Anexo I - Conceitos Básicos, além de algumas definições de interesse no presente trabalho, são apresentados vários modelos reológicos e, entre eles, os modelos de Bingham, Herschel-Bulkley e Newton.

Assim exposto, torna-se oportuno investigar o comportamento reológico e mecânico de misturas hiperconcentradas com presença de grãos, para fins de engenharia.

CAPÍTULO II - ESTADO DA ARTE

A presença de materiais sólidos nos fluidos newtonianos pode modificar seu comportamento reológico. Dentre as possíveis alterações, está o aparecimento de uma tensão crítica anterior ao escoamento. Essa tensão chamada de crítica ou inicial é a tensão abaixo da qual o fluido pode resistir a tensões superficiais sem escoar (se deformando como um sólido elástico) e acima da qual o material escoa como um fluido.

Analisando, por exemplo, quatro escoamentos de fluidos diferentes (conforme Figuras 03a, 03b e 03c), nota-se que, os escoamentos totais dos fluidos requerem maiores tempos respectivamente da esquerda para a direita. No entanto, os resultados finais dos três primeiros são parecidos entre si. Já o quarto fluido apresenta comportamento diferenciado dos demais. A explicação para esse fenômeno é a presença de uma tensão de cisalhamento crítica (τ_c) limitante para a deformação do fluido.

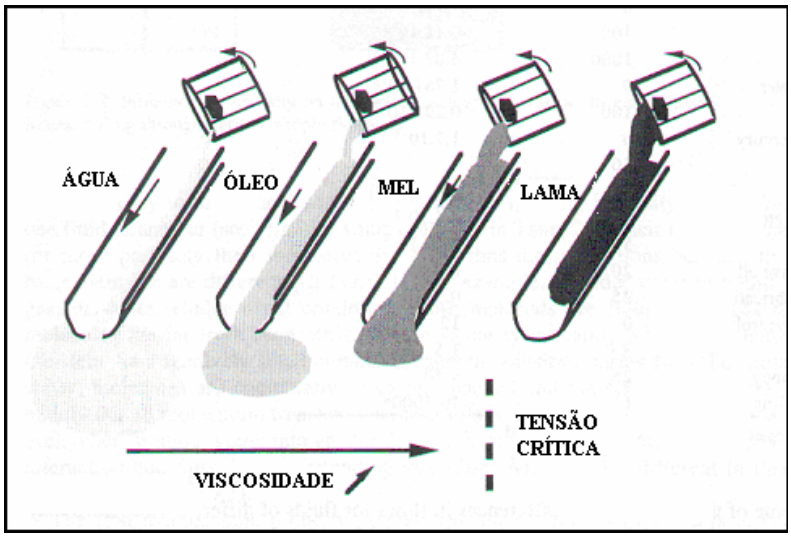
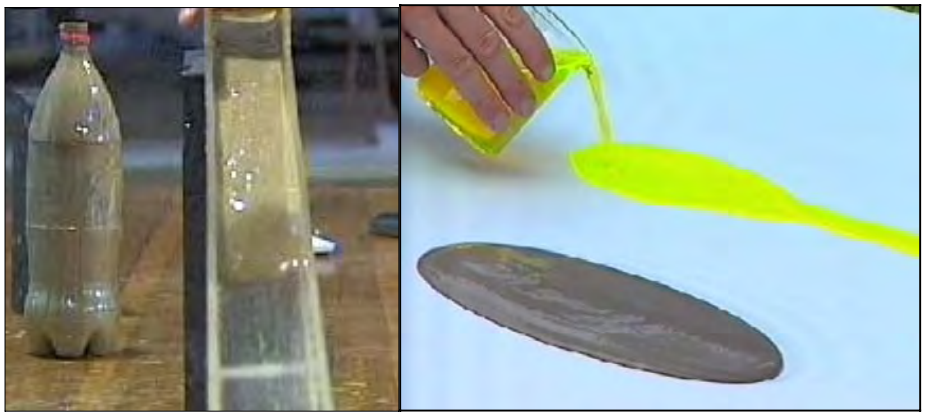


Figura 03a: Escoamento de água, óleo, mel e lama respectivamente (Coussot, (1997) – Mudflow Rheology and Dynamics)



(b) (c)

Figura 03: b) Escoamento de mistura água+argila (Laboratório de Hidrologia e Hidrometria – Unesp/Ilha Solteira) – c) Escoamento de lama e água com corante

Devido à complexidade do comportamento destes materiais, vários modelos reológicos foram propostos para descrever as relações entre as tensões de cisalhamento e as taxas de deformações aplicadas.

Algumas definições auxiliares na compreensão de conceitos envolvidos nesta Dissertação podem ser encontradas no Anexo I.

II.1 - Misturas compostas de água+argila+detritos

Muitos parâmetros são importantes na caracterização de escoamentos que apresentam materiais em duas fases (fluido + partículas). Ademais, vários regimes de escoamentos podem ser gerados dependendo do tipo de interação entre as partículas e o fluido e entre as próprias partículas; a concentração de sólidos e as suas propriedades; as taxas de deformação e a viscosidade do fluido intersticial.

Há uma vasta literatura que tenta descrever as tensões de escoamento de uma suspensão de sólidos inertes em um fluido viscoso tratando separadamente o que ocorre com a velocidade do fluido e das partículas sólidas (analisando suas médias locais e componentes aleatórias). Seguindo esse raciocínio, uma grande variedade de interações, que dependem da interação de cada campo de velocidade, podem também ser observadas. Para partículas pouco reativas imersas em uma matriz fluida viscosa, as principais interações que podem ocorrer são do tipo:

- Interações entre as partículas e o fluido, interações estas oriundas da diferença de velocidade desses dois agentes, resultando no aumento da

força de arraste que é a parte não aleatória do movimento das partículas inertes;

- Interações de partículas com a componente flutuante da velocidade do fluido. Isso pode causar um fluxo de energia cinética, em qualquer direção, entre as componentes aleatórias das velocidades do fluido e das partículas;

- Interação entre partículas causadas pelos movimentos aleatórios dos grãos. Isso gera tensões que aumentam as dissipações de energia dentro do fluido e, dessa forma, acarretam o aumento da viscosidade aparente da mistura; e
- Interação entre a parte flutuante da velocidade e a velocidade média do fluido, a qual gera as tensões de Reynolds.

É improvável obter um tratamento incluindo todos esses efeitos, especialmente devido à falta de entendimento sobre os efeitos turbulentos. Contudo, restringindo-se o modelo para um único tamanho de partícula, restringindo-se concentrações e estabelecendo-se condições de escoamento, o trabalho torna-se mais tratável, uma vez que este será caracterizado pelo número de Reynolds de partículas (Re_p) e o número de Bagnold (B) que são, respectivamente, medidas do fluido e de forças de inércia das partículas sendo, ambos, dependentes da viscosidade do fluido.

Além de todas essas interações apresentadas, uma outra problemática que envolve estudos de escoamentos de fluidos bifásicos é que o fluido intersticial (matriz fluida homogênea que tem como objetivo a lubrificação dos movimentos relativos das partículas inertes) aqui tratado, é de natureza não-newtoniana. É sabido que o comportamento desse tipo de fluido segue algumas particularidades (LLEDO, 2003) que podem causar variações nas interações anteriormente citadas.

Com o objetivo da compreensão destas modificações nos efeitos de interações entre fluido-partícula sólida, partículas-partículas e fluido-fluido, são feitos comentários presentes nos subitens que se seguem.

II.1.1 - Propriedades das partículas

II.1.1.1 - Movimentação Browniana

Considerando uma partícula suspensa em um líquido que possui suas moléculas muito menores que as partículas, podem surgir os seguintes efeitos: devido à agitação térmica, moléculas do fluido intersticial colidem com partículas a todo instante; se o tamanho das partículas é grande o bastante, as colisões, contra sua superfície, se tornam numerosas e induzem uma pressão isotrópica na superfície da partícula. Ao contrário, se o tamanho da partícula é muito pequeno (colóides), as distribuições e intensidade das colisões flutuam de uma região da superfície da partícula para outra, essas flutuações de forças geram rapidamente movimentos desorientados, rotações e translações na partícula.

Na ausência de outras forças, partículas coloidais se difundem no interior do líquido (movimento Browniano). A difusão devido a este movimento pode ser descrito pela lei de Fick:

$\frac{dm}{dt} = -DS\frac{d\phi}{dx}$, sendo: (01)

D : Coeficiente de difusividade do meio na direção x;

S : Área da seção transversal considerada (área que as partículas atravessam);

ϕ : Concentração sólida da mistura;

$\frac{dm}{dt}$: Fluxo de massa; e

$\frac{d\phi}{dx}$: Gradiente de concentração.

Segundo Russel (1981), durante um curto período de tempo, na direção x, a média de deslocamento espacial pode ser chamada de Δx que pode ser escrito como:

$$\Delta x = \sqrt{2Dt} \qquad (02)$$

e

$$D = \frac{\kappa T}{f}\text{, sendo:} \qquad (03)$$

t : Tempo de duração;

κ : Constante de Boltzmann (1,38066 10^{-23} J/K);

T : Temperatura absoluta; e

f : Coeficiente de atrito entre a partícula e o fluido.

Para uma partícula isolada de raio *R* em um volume infinito de um líquido newtoniano, f é deduzida a partir da lei de Stokes como sendo:

$$f = 6\pi\mu R \qquad (04)$$

Quando o líquido é não-newtoniano, interações hidrodinâmicas, devido à presença de outras partículas, não são desprezadas e, assim, f é ligeiramente maior que o valor dado pela Equação 04.

II.1.1.2 - Sedimentação

Para uma partícula sólida de volume Ω caindo a uma velocidade constante dentro de um fluido homogêneo estático, a velocidade da partícula pode ser estimada através do balanço das forças de resistência ao movimento exercida pelo fluido e a força gravitacional subtraída do empuxo do fluido sobre a partícula. Pode-se assumir que a pressão distribuída ao redor da partícula é hidrostática, e que, varia linearmente com a profundidade. A força de empuxo é igual ao peso do fluido deslocado e o balanço de força é dado como:

$F = (\rho_s - \rho_f) g\Omega$, sendo: (05)

F : Força resultante;

ρ_s : Massa específica do grão;

ρ_f : Massa específica do fluido intersticial; e

g : Aceleração da gravidade.

Determinando-se a Equação 05 pode-se determinar a velocidade de sedimentação das partículas, o problema é como determinar a força *F.* Quais os valores que dependem de parâmetros reológicos do fluido ao redor e da velocidade e da forma da partícula?

Para uma partícula solitária caindo vagarosamente através de um volume infinito de um fluido newtoniano estático, a resistência do fluido envolvente com relação à esfera é dada pela lei de Stokes (COUSSOT, 1997). Esta lei está demonstrada na Equação 06.

$F = F_0 = 6\pi\mu RV$, sendo: (06)

V : Velocidade de queda da partícula;

μ : Viscosidade do fluido; e

R : Raio da partícula.

Dessa forma, comparando as Equações 05 e 06 tem-se:

$$V = \frac{2(\rho_s - \rho_f) g R^2}{9\mu} \quad (07)$$

As Equações 06 e 07 devem ser modificadas, já que, o volume do fluido intersticial não pode ser considerado infinito, particularmente, para uma solução bifásica (ϕ>1%) de esferas idênticas, *F* é notavelmente maior que F_0. Este fenômeno pode ser representado como uma relação de uma função de resistência *s(ϕ)* da seguinte forma:

$$F = \frac{F_0}{s(\phi)} \qquad (08)$$

Para suspensões coloidais, a função de resistência *s(ϕ)* depende da natureza das forças de interação. Por exemplo, forças de interação predominantes aumentarão a velocidade de sedimentação (WAN E WANG, 1994).

Entretanto, mesmo para sistemas não coloidais, a expressão exata de *s(ϕ)* não é bem conhecida. Segundo Coussot (1997), pode-se determinar *s(ϕ)*, a partir de dados experimentais e teóricos, de duas formas, a saber:

Para partículas de diâmetros uniformes:

$$s = 1 - a\phi^{1/3} \qquad (09)$$

Para partículas de tamanhos aleatórios:

$s = 1 - b\phi$, sendo: (10)

a e b : Constantes numéricas definidas experimentalmente.

Por exemplo, para uma dispersão de diâmetros aleatórios, Batchelor (1972) determina *b=6,55* e para uma mistura de diâmetros de mesma ordem Sangai e Acrivos, (1982) determinaram *a=1,76*. Na prática, para uma concentração ϕ menor que a máxima concentração de empacotamento (ϕ_{max}) é utilizada a seguinte equação de resistência:

$$s = (1 - \phi)^N \qquad (11)$$

Garside e Al-Dibouni (1977), encontraram um expoente *N=5*,1 para Equação 11. Para baixas concentrações de partículas esféricas em fluido newtoniano, a velocidade de sedimentação também foi estimada analisando-se os movimentos locais e globais (estudou-se particularmente a formação de uma densa fronteira de partículas, causada pelo fato de que todas as partículas de mesmo diâmetro e mesma massa sedimentam à mesma velocidade, que se

propaga de cima para baixo no recipiente), os quais dependem do tamanho e da forma dos recipientes.

Ao contrário de suspensões de partículas uniformes, em suspensões de partículas aleatórias cada um dos grãos move-se diferentemente, pois o efeito da gravidade sobre esses grãos é proporcional à superfície da partícula, de mesma massa.

Uma partícula não-coloidal e não-esférica que sedimenta em um fluido newtoniano mantém uma mesma orientação inicial quando sua velocidade é suficientemente baixa, de maneira que o "Número de Reynolds da partícula" é definido como:

$$\mathrm{Re}_p = \frac{\rho_f V r}{\mu}$$, sendo: (12)

ρ_f: Massa específica do fluido intersticial;
V: Velocidade de sedimentação; e
r : Dimensão característica da partícula.

Este número Re_p é muito menor que 1. Entretanto, neste caso, a força exercida pelo fluido depende da orientação da partícula e da sua forma (MUNSON, 1994).

Quando o valor de Re_p for da ordem de 1, a partícula eventualmente adotará uma orientação que é independente de sua orientação inicial. De uma forma geral, para movimentos de partículas rápidos ou moderados (Re_p muito maior que 1), a expressão da força exercida pelo fluido sobre a partícula é uma função (muito mais complexa) da velocidade, da dimensão característica e da rugosidade da partícula.

Considerando uma partícula relativamente grande caindo em um fluido não-newtoniano, quando a força *F* é conhecida, é possível se estimar a velocidade constante de sedimentação dessa partícula (Equação 05).

Determinando-se a velocidade de equilíbrio de sedimentação, é possível determinar a razão que define o tempo característico de sedimentação (ℓ/V), sendo ℓ o comprimento característico de queda, quando essa razão é muito maior que 1, a sedimentação pode ser desprezada.

II.1.2 - Propriedades físicas de suspensões

II.1.2.1 - Interação entre partículas esféricas imersas em um fluido não-newtoniano

II.1.2.1.1 - Considerações gerais sobre interações hidrodinâmicas

Considerando uma suspensão de partículas esféricas pouco reativas em um fluido perfeitamente homogêneo, quando as esferas encontram-se longes umas das outras, estas interagem apenas hidrodinamicamente. Isso significa que os movimentos relativos das partículas são devidos ao movimento do fluido intersticial que dissipa energia por ação viscosa.

Desde que as partículas permaneçam longe umas das outras, a energia dissipada por ação viscosa é ligeiramente maior que a energia dissipada em um movimento apenas do fluido intersticial (sem partículas). Dessa forma, a viscosidade da suspensão (fluido intersticial+partículas sólidas) é ligeiramente maior que a viscosidade do fluido intersticial apenas.

Quando a proximidade entre as partículas aumenta, a energia dissipada durante o movimento aumenta e se duas partículas tornam-se mais próximas a força devido ao escoamento do fluido entre as esferas deve aumentar.

Para um fluxo laminar de uma suspensão de fluido newtoniano com esferas do mesmo tamanho, se a razão entre a distância entre as esferas e o raio das partículas for muito menor que 1, pode-se determinar a força de interação entre as partículas em função da velocidade normal e tangencial em relação ao centro da distância entre as partículas. Segundo Cox (1974), a força normal devido a componente normal da velocidade é definida como:

$$f_1 = -\mu \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{3\pi R}{2}\right) V_N \text{, sendo:} \qquad (13)$$

f_1 : Força devida à componente normal da velocidade;

μ : Viscosidade do fluido newtoniano;

ε : Razão entre a distância entre as esferas e o raio das partículas;

R : Raio da esfera; e

V_N : Componente normal da velocidade.

A força tangencial oriunda da componente tangencial da velocidade é definida como (COX, 1974):

$f_2 = \mu\left|\ln\varepsilon\right|\pi R V_T$, sendo: (14)

f_2 : Força devida à componente tangencial da velocidade; e

V_T : Componente tangencial da velocidade.

E a força normal devido à componente tangencial da velocidade relativa é dada como (CAMERON, 1976):

$$f_3 = \mu\sqrt{\frac{1}{\varepsilon}}\left(\frac{6\pi R}{5}\right)V_T \quad (15)$$

Para uma suspensão com partículas de diâmetros homogêneos, pode-se estimar o valor de ε pela Equação 16.

$$\varepsilon = 2\left(\left(\frac{\phi_{\max}}{\phi}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right) \text{ sendo;} \quad (16)$$

ϕ_{max}: Máxima concentração de empacotamento da suspensão (concentração acima da qual ocorre fraturação da amostra – descontinuidades na massa da mistura);

ϕ: Concentração de sólidos na mistura.

II.2.2.1.2 - Contato direto entre as partículas

Segundo Coussot (1997), quando a distância de separação entre as partículas tende a zero, dois grãos estão em contato direto. Simplificando o problema (tirando o fluido intersticial) pode-se considerar que duas esferas no vácuo interagem por atrito durante longos períodos de contato ou por colisões durante contatos instantâneos.

De um ponto de vista mecânico, o atrito e a colisão são muito bem definidos, porém é muito difícil separar esses efeitos na prática, isso porque é muito provável que micro-colisões ocorram durante o atrito entre as partículas e que parte da energia seja dissipada por atrito durante as colisões.

Os resultados da análise do processo de interação entre as partículas em uma micro-escala são: as superfícies sólidas entram em contato via múltiplos pontos de contato discretos; deformações ocorrem nas regiões dos pontos de contato; essas deformações podem ser plásticas, ou elásticas, ou visco-plásticas, ou visco-elásticas; dependendo da forma da superfície; das propriedades do material e das forças e tensões aplicadas (BHUSHAN, 1996 e TABOR 1981).

Para esferas imersas em um fluido, o processo de interação entre os grãos é diferente do que ocorre em um gás ou no vácuo, pois as dissipações viscosas dentro do fluido devido ao movimento das partículas são muito significativas, em muitos casos a dissipação de energia é tão elevada que anula os contatos diretos dentro do fluido. Quando o valor de ε tende a zero as três equações básicas das forças hidrodinâmicas (Equações 13, 14 e 15) tendem a infinito de modo que as partículas tornam-se mais próximas umas das outras e a resistência ao movimento relativo de uma partícula com relação a outra torna-se infinito.

De fato, quando a camada de fluido intersticial, entre as partículas, torna-se extremamente fina, muitos fenômenos complexos podem ocorrer: como a partícula não é perfeitamente lisa, contatos diretos muito bem localizados podem ocorrer, para suspensões onde o fluido intersticial é um líquido. Nos pontos de contato, podem ocorrer ligeiras deformações do sólido ou ligeiras compressões do líquido (DAVID *et al*, 1986; KYTOMAA e SCHMID, 1992; LIAN *et al*, 1996; VAN VLIET, 1996).

II.1.2.1.3 - Interações entre grãos em uma mistura de água+argila

Na prática, em uma suspensão granular, para considerar os efeitos de colisão, deve-se levar em conta a forma e a rugosidade das partículas, o fluido intersticial e a possibilidade de contatos múltiplos (três ou mais partículas entrando em contato ao mesmo tempo). Um tratamento teórico que leve em consideração todos esses efeitos ainda está distante.

No caso de grãos imersos em uma suspensão de água+argila o problema é mais complexo já que o fluido intersticial contém partículas sólidas cujos diâmetros podem ser da mesma ordem de grandeza da distância entre as partículas. Quando esses grãos são separados por uma camada de fluido intersticial (água+argila) considerada espessa se comparada com o diâmetro das partículas de argila, as interações que ocorrem são do tipo hidrodinâmicas.

Movimentos relativos entre duas partículas induzem tensões macroscópicas nas camadas de água+argila. Quando a espessura da camada de separação de água+argila é aproximadamente igual ao diâmetro das partículas de argila, essa camada não pode ser considerada por muito tempo como sendo um meio contínuo.

A exata natureza das interações abaixo dessas condições não é bem determinada, contudo, esse tipo de interação pode ser complicada pelo movimento da mistura água+argila dentro e fora dos orifícios formados pela rugosidade do grão. Quando estes grãos passam a ter contatos diretos efetivos, a natureza destas interações deve ser mais ou menos similar as descritas anteriormente como colisões e atritos; além disso, presença das partículas de argila, a qual pode estar dentro dos orifícios dos grãos, torna-se um efeito adicional e complicador desse processo.

II.1.2.1.4 - Interações no interior de uma suspensão de lama

Dependendo da escala de observação de um volume de suspensão de grãos em uma mistura de água+argila pode-se distinguir diferentes interações locais predominantes como: interações de moléculas de água, interações de partículas e argila, atritos ou colisões entre grãos, escoamentos de água+argila, etc.

Não é possível determinar, a priori, qual será o tipo de interação predominante dentro da suspensão. Certamente o tensor de tensões macroscópico depende da transferência de tensões através dos materiais (BATCHELOR, 1967), mas a importância relativa das tensões transmitidas via as várias interações não pode ser determinado a priori.

II.1.3 - Forças em suspensões lamosas

II.1.3.1 - Corpos imersos em um fluido não-newtoniano homogêneo

Quando um corpo é imerso em uma suspensão lamosa, uma série de efeitos tais como empuxo, força de arrasto, pressão estática, etc. podem ser gerados nas interações fluido-partículas. Os principais efeitos numa suspensão lamosa envolvendo um obstáculo podem ser separados em três tópicos, a saber:

III.1.3.1.1 - Força estática crítica anterior ao movimento

Uma das propriedades do campo de tensões de um fluido não-newtoniano é poder suportar forças finitas durante seu repouso. Esta é uma clara conseqüência da tensão crítica deste tipo de mistura, dessa forma, uma partícula suficientemente pequena pode ser suportada pelo campo de tensões destes fluidos durante o repouso.

De um ponto de vista geral, isso significa que a partícula imersa no fluido deve exercer uma tensão mínima sobre ele para que seja iniciado o movimento. Embora esse problema pareça simples, possui um difícil tratamento matemático, pois os mecanismos que regem a tensão crítica das misturas ainda permanecem nebulosos.

Buscam-se explicações para este fenômeno baseados em informações obtidas durante testes de cisalhamento simples de amostras desse tipo, porém esse tipo de análise representa apenas o campo de tensões do fluido durante o cisalhamento simples, não demonstrando satisfatoriamente o campo de tensões do fluido em repouso (COUSSOT, 1997).

Considerando uma partícula esférica de diâmetro *"d",* embebida em uma suspensão lamosa, a análise mais simples possível é que, imediatamente após o início do fluxo, a tensão exercida pelo fluxo (tensão correspondente à tensão de cisalhamento e que por sua vez é igual ao campo de tensões do fluido ao redor da partícula) é tangencial ao obstáculo. Integrando esse campo de tensões ao redor dessa partícula esférica encontra-se que a força total resultante na direção do fluxo é dada por (DU PLESSIS e ANSLEY, 1967):

$F = \Pi \tau_c \pi d^2$, sendo: (17)

F : Força total resultante;

Π : Coeficiente de resistência crítica (igual a $\pi/4$ para esse caso); e

τ_c : Tensão crítica da mistura.

Esse esquema é muito simplificado e, na realidade, é muito provável que a distribuição de tensões ao redor da partícula seja muito mais complexa. Contudo essa fórmula é dimensionalmente relevante, pois contém todos os parâmetros importantes, apenas o valor de Π deve ser previamente determinado.

Alguns autores como Hill (1950), propõem um refinamento da teoria anteriormente apresentada, em particular assumem que na condição estática o campo de tensões do fluido pode ser considerado como o de um corpo sólido ideal com uma tensão crítica e, dessa forma, faz-se uma análise baseada na teoria plástica. Dentro dessa linha de pesquisa, o campo de deformações é estimado ou determinado através dos princípios de energia máxima, em particular, pode-se determinar a superfície ao longo da qual deslizamentos ou rupturas ocorrem em um corpo sólido, ou a tensão crítica correspondente para a suspensão lamosa em questão.

Com o auxilio dessa técnica, Johnson (1970) determinou a força exercida por um fluido hiperconcentrado em um corpo parcialmente imerso na superfície livre. O resultado da extrapolação para o caso de um grão submerso determinou um coeficiente de resistência crítica (Π) igual a 1,41 (HAMPTON, 1975).

Contudo, a análise completa do problema de suspensão de uma esfera em um fluido hiperconcentrado é mais complexa, pois o problema de simetria em plasticidade ideal é governado por equações elípticas. Em geometrias planas as equações análogas são hiperbólicas e as linhas de deslizamento se desenvolvem ao longo de direções características, nas quais o material sofre tensões puramente por deformações, com o valor da tensão igual ao valor da tensão crítica (BERIS et al., 1985).

Mesmo não utilizando as equações que levam em consideração as condições planas em suas avaliações, Ansley e Smith (1967) utilizaram idéias da teoria das linhas de deslizamento bidimensionais em um material rígido e

plástico. Eles aproximaram a superfície de tensão crítica por um material visco-plástico como um toróide centrado no equador da esfera com um raio de $d/2\sqrt{2}$ e assim determinaram um $\Pi = 7\pi/8$.

Glowinski et al. (1981) combinaram as variáveis entre si usando técnicas numéricas de aproximações por diferenças finitas ou elementos finitos e modelaram, com precisão, escoamentos viscoplásticos confinados. Beria et al. (1985), utilizando uma técnica semelhante modelaram a distribuição de velocidades e a força de arrasto ao redor de uma partícula esférica e determinou um valor de $\Pi \approx 3,5$. Comparando os valores do coeficiente de resistência crítica estimados por Ansley e Smith (1967) e por Beris et al. (1985), presume-se que seja uma boa estimativa prática um valor de Π da ordem de 3,0.

Deve-se, entretanto, lembrar que esse valor de Π é estimado para tensões críticas obtidas para fluidos Binghamianos. Como é sabido a aproximação de Bingham aumenta muito as tensões críticas de fluidos viscoplásticos que obedecem a leis do tipo Herschel-Bulkley, de tal forma que o valor de Π para as tensões críticas obtidas de modelos tipo Herschel-Bulkley possuem um valor muito mais baixo (aproximadamente 1,7) como será visto no item **II.1.3.1.3 - Força de arrasto**.

II.1.3.1.2 - Campo de escoamento ao redor de uma esfera

Volarovich e Gutkin (1953) foram os primeiros pesquisadores a constatar que uma partícula esférica caindo em um fluido Binghamiano é envolvida por uma pequena camada de fluido, separando a partícula através de uma parte rígida (de fluido), na qual a tensão fica abaixo da tensão crítica. Poucos estudos têm sido feitos para serem somados aos estudos já existentes dos campos de escoamento neste tipo de fluido.

Adashi e Yoshioka (1973) usaram princípios variacionais para estimar o campo de velocidade de escoamentos deste tipo. Contudo, provavelmente devido a suposições imaturas a respeito do campo de tensões, seus resultados estão em completa discordância com os obtidos por outros autores.

Beris et al. (1985), com a ajuda de métodos de elementos finitos, obtiveram o mais completo conjunto de resultados para campos de velocidade ao redor de uma esfera. A camada que envolve a partícula possui a forma

aproximada da demonstrada na Figura 04. Esta camada é composta essencialmente de dois lóbulos simétricos de cada lado da esfera e longitudinais ao sentido de escoamento do fluido. Esses resultados parecem ter uma boa concordância com os resultados obtidos por Ansley e Smith (1967) que utilizaram a teoria das linhas de deslizamento (visto anteriormente).

Ademais, esses resultados qualitativos correspondem a idéias intuitivas e são análogos aos resultados obtidos para escoamentos de fluidos em superfície livre ao redor de obstáculos parcialmente submersos. Estes resultados são válidos para fluidos Binghamianos e, obviamente podem ser quantitativamente muito similares para fluidos do tipo Herschel-Bulkley.

Não obstante, de um ponto de vista quantitativo, a predição de Beris et al. (1985) e Ansley e Smith (1967) têm leves discordâncias para com os dados experimentais obtidos por Atapattu et al. (1995). Como foi apontado por Atapattu et al. (1995), as diferenças originaram, provavelmente, do fato de se considerar uma curva de escoamento de um fluido que obedece ao modelo de Bingham e, na prática, o modelo de Herschel-Bulkley ser claramente mais apropriado.

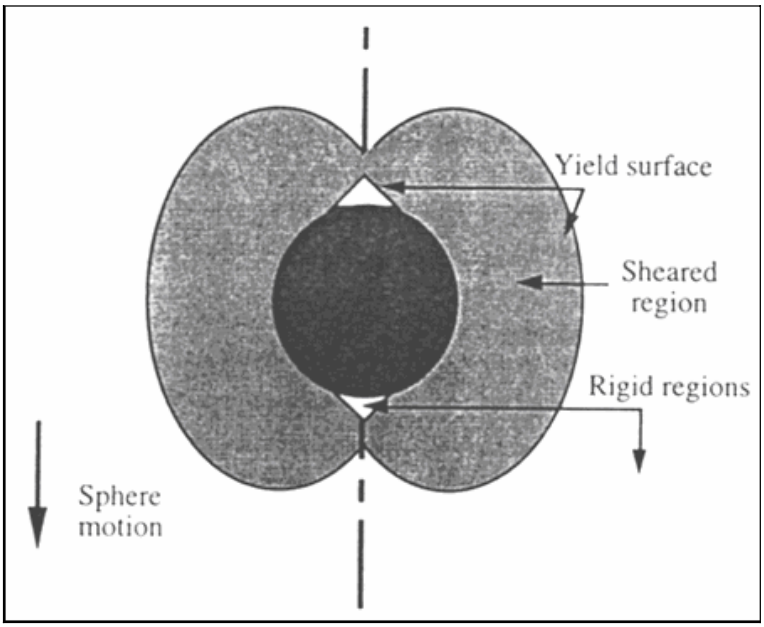


Figura 04: Aparência do campo de velocidades para uma partícula esférica caindo no interior de um fluido que possui tensão crítica (BERIS et al., 1985); "sphere motion" – sentido de movimentação da esfera, "rigid regions" – região que se comporta como um sólido; "Sheared region" – região cisalhada e "Yield surface" – superfície crítica

II.1.3.1.3 - Força de arrasto

Vários pesquisadores trabalharam para a determinação da força de arrasto de um escoamento uniforme sobre uma partícula esférica (VALENTIK e WHITMORE, 1965; BROOKES e WHITMORE, 1969; ANSLEY e SMITH, 1967; WAN, 1985; DU PLESSIS e ANSLEY, 1967, PAZWASH e ROBERTSON, 1975; HANKS e SEM, 1983). Em geral o coeficiente de arrasto é definido como:

$$C_d = \frac{8F}{\rho\pi\upsilon_r^{\,2} d^2} \qquad (18)$$

sendo:

υ_r : Velocidade relativa da esfera em relação a velocidade do fluido.

Considerando algumas vezes uma forma arbitrária e uma grande incerteza sobre a tensão crítica, é muito difícil garantir a validade dos resultados. Ansley e Smith (1967) propuseram uma análise teórica para o problema, tal análise aparenta ter uma boa concordância com a solução obtida por Beris et al. (1985) por elementos finitos e também não ficou tão longe de muitos de seus resultados experimentais. Mesmo se isso provar de maneira grosseira, embora prática, estimativa da força de arraste, acredita-se que essas análises são valiosas para descrever futuros desenvolvimentos sobre esse assunto.

Para fluidos Binghamianos a força de arrasto é considerada igual a soma de uma tensão constante (correspondente a tensão crítica) e uma velocidade dependente da tensão, a qual pode ser estimada considerando-se que os efeitos dinâmicos induzidos próximos às partículas são devidos aos efeitos de escoamento tipo Stokes. A força de arrasto total sobre a partícula é dada pela Equação 19.

$F_a = \Pi\tau_c \pi d^2 + 3\pi\mu_B dV$, sendo: (19)

F_a : Força total de arrasto; e

μ_B : Viscosidade do fluido Binghamiano (viscosidade plástica).

Obviamente, para condição de repouso do fluido, apenas o primeiro termo do segundo membro da equação deve ser considerado e, assim, retorna-se para a Equação 17. A mesma análise pode ser feita para fluidos do tipo Herschel-Bulkley com a consideração que a força de arraste de Stokes é do mesmo tipo da força sobre um fluido de Ostwald (1925), tal força corresponde a velocidade induzida que gera parte da força de arrasto. Esta força pode ser estimada pela Equação de Wasserman e Slattery (1964) (Equação 20).

$F_a = \Pi \tau_c \pi d^2 + 3\pi\chi k d^{2-n} V^n$, sendo: (20)

χ : Valor de correção (valor que pode variar de 1,1 a 1,5);

k : Índice de ajuste de Herschel-Bulkley; e

n : Constante igual a 0,33 (valor do índice de escoamento adotado por Coussot para ajustes de Herschel-Bulkley em concentrações lamosas com C_v de 20 a 30%). Índice também encontrado por Lledo (2003).

Sendo Π o coeficiente definido anteriormente, pode-se determinar o valor da força de arraste.

Atapattus et al. (1995) realizaram medições de velocidade de queda de partículas esféricas no interior de fluidos viscoplásticos. Esses pesquisadores ajustaram as curvas de escoamento das amostras para o modelo de Herschel-Bulkley.

Para este novo modelo reológico, Atapattus et al. determinaram um valor de Π igual a 1,7. Este resultado esta em discordância com o valor de Π proposto no item **II.1.3.1.1 - Força estática crítica anterior ao movimento,** em função das considerações citadas no mesmo item.

II.1.4 - Efeitos de inércia

Para qualquer tipo de fluido, efeitos de inércia podem se tornar significativos para escoamentos rápidos de suspensões. Dessa forma, para suspensões, duas classes de efeitos de inércia podem ser distinguidas:

1ª) Pode-se observar, macroscopicamente, turbulência dentro da suspensão. Dessa forma, as equações constitutivas validadas para escoamentos turbulentos não estão longe de serem validas para este caso e a dissipação de energia ou a resistência ao escoamento podem ser determinados por equações que levam em consideração condições como: velocidade de escoamento, rugosidade, etc; e

2ª) Um segundo efeito que inclui três tipos de interações originadas da estrutura granular da suspensão (BATCHELOR, 1970), esse efeito, a priori, não depende do efeito de turbulência macroscópica:

- Turbulência dentro do fluido intersticial no interior dos poros das partículas (para que essa interação aconteça a fração sólida deve ser tal que o volume dos poros seja da ordem do volume das partículas);
- Colisões de Grãos; e
- Interação entre a flutuação da velocidade dos grãos em relação à velocidade média do escoamento.

Experimentalmente é difícil distinguir estes efeitos uns dos outros. Dessa forma torna-se também difícil de notar, a não ser teoricamente, que o escoamento de suspensões permaneça laminar macroscopicamente, enquanto um tipo de turbulência microscópica ocorra no interior desse mesmo escoamento devido a uma estrutura particular do fluido.

Seguindo este raciocínio alguns modelos foram desenvolvidos, o que torna possível deduzir (para um regime laminar) as equações constitutivas a partir de uma boa descrição do fenômeno inercial macroscópico. Embora estes modelos sejam teoricamente satisfatórios, uma importante questão permanece aberta: Quando efeitos de inércia locais (por exemplo, colisões) serão tão significativos que as equações constitutivas macroscópicas dependerão deles? Poderá o escoamento permanecer macroscopicamente laminar nestas condições?

Isto ocorre com gases devido às variações das movimentações erráticas das partículas serem grandes se comparadas com o tamanho das partículas

(moléculas). Dessa forma, as colisões locais não influenciam em outras regiões do fluxo.

Isso não é o que ocorre no caso dos líquidos: neste caso, quando turbulências ocorrem, efeitos locais de inércia têm influência por todo o material. Além disso, condições de contorno macroscópicas influenciam a forma de dissipação de energia local através de processos inerciais.

A conclusão que se pode ter dessas considerações é que a faixa de validade do modelo citado abaixo é certamente muito limitada.

II.1.4.1 - Modelo de Bagnold

Bagnold (1954) foi o primeiro pesquisador a propor equação constitutiva para uma suspensão onde colisões são predominantes. Na realidade para o então chamado regime inercial, Bagnold considera que transferências de quantidade de movimento (*momentum*) são produzidas principalmente por colisões elásticas entre partículas que se movem em linhas paralelas, uma em relação à outra.

A quantidade de movimento transmitida através de cada colisão é proporcional à velocidade relativa entre duas partículas que entram em colisão, velocidade essa proporcional à taxa de deformação ($\dot{\gamma}$). Da mesma forma a freqüência das colisões também é proporcional a $\dot{\gamma}$.

A tensão de cisalhamento originada na colisão das partículas é, dessa forma, proporcional a $\dot{\gamma}^2$. Estes resultados encontrados estão em acordo com alguns resultados experimentais (BAGNOLD, 1954; SAVAGE e SAYED, 1984).

Na análise de Bagnold a principal incerteza é com relação ao processo de colisão das partículas: rotação de partículas, velocidade angular, flutuações, etc. Estes fenômenos podem ser analisados através do coeficiente de proporcionalidade entre τ e $\dot{\gamma}^2$. Em particular, desde que seja considerado o movimento relativo entre duas partículas vizinhas, o aumento da concentração de partículas gera um aumento do número de partículas em cada linha de corrente, bem como o aumento do número de linhas de corrente que transportam partículas e, dessa forma, ocorre um acréscimo do número de colisões e um aumento da viscosidade da mistura. A seguir serão

apresentados comentários mais aprofundados sobre os trabalhos desse pesquisador.

II.1.4.1.1 - Estudos experimentais de Bagnold

Os estudos modernos de escoamentos de fluidos com material granular foram iniciados por Bagnold (1954). Esse pesquisador realizou experimentos com grãos esféricos uniformes, feitos com cera e materiais ligantes, dispersos em fluidos newtonianos de diferentes viscosidades (água e misturas de água+álcool+glicerina), cisalhados no espaço anular entre dois cilindros verticais concêntricos. Nesses experimentos de cisalhamento simples, o cilindro interno permanecia parado enquanto o externo girava.

Bagnold (1954) utilizou partículas flutuantes para determinar a condição a partir da qual as partículas começam a sofrer os efeitos das forças de aceleração radial. O torque recebido pelo cilindro interno e a pressão normal na direção radial foram medidos para várias concentrações de partículas em diferentes tipos de líquidos, para várias taxas de cisalhamento.

Bagnold (1954) define dois importantes tipos de regimes de escoamento. Estes regimes são definidos como:

- Regime inercial dos grãos: No regime inercial dos grãos a taxa de cisalhamento é alta e a inércia sobre o movimento dos grãos é dominante; e
- Regime macro-viscoso: No regime macro-viscoso as taxas de cisalhamento são baixas e, assim, os efeitos do fluido intersticial viscoso dominam.

Para a determinação desses regimes de escoamento, Bagnold plotou seus resultados na forma de grupos adimensionais definidos nas Equações 21 e 22 em função da tensão de cisalhamento adimensional (B – número de Bagnold) definida na Equação 23.

$\frac{\tau \rho_s d^2}{\psi \eta^2}$, sendo: (21)

τ : Tensão de cisalhamento;

ρ_s : Massa específica dos sólidos;

d : Diâmetro dos grãos;

ς : Distância de separação entre duas partículas esféricas;

Ψ : Concentração linear ($\psi = \frac{D}{\varsigma}$); e

η : Viscosidade absoluta do fluido intersticial.

$\frac{P \rho_s d^2}{\psi \eta^2}$, sendo: (22)

P : Tensão dispersiva ou pressão normal.

$B = \frac{\psi^{\frac{1}{2}} \rho_s d^2}{\eta} \frac{dU_B}{dy}$, sendo: (23)

$\frac{dU_B}{dy}$: Taxa de deformação$(\dot{\gamma})$.

O número de Bagnold (B), representa a razão entre as forças cisalhantes e as forças viscosas em um escoamento (considerando o escoamento como um cisalhamento simples). Segundo Bagnold existem 3 regiões com características distintas de escoamento, essas regiões são: a região macro-viscosa e a região inercial-granular, que são ligadas por uma zona de transição. Bagnold determinou que em um fluxo de fluido com material granular, a região inercial de grãos ocorre para B>450, a região macro-viscosa para B<40 e a zona de transição estava localizada entre 40<B<450. Deve-se enfatizar que na zona de transição, tanto os efeitos viscosos como os inerciais de grãos são importantes.

Baseados em seus dados experimentais, Bagnold (1954) determinou a expressão da tensão de cisalhamento no limite da faixa macro-viscosa como uma função linear da taxa de deformação (Equação 24).

$$\tau = \mathrm{a}_v \psi^{\frac{3}{2}} \eta \frac{dU_B}{dy} \sin\phi_{dv} \text{, sendo:} \qquad (24)$$

a_v : Constante numérica (determinada experimentalmente como 3,75); e

ϕ_{dv} : Ângulo dinâmico de atrito interno na faixa macro-viscosa.

Dessa forma pode-se reescrever a Equação 24 como:

$$\tau = \eta_v \frac{dU_B}{dy} \qquad (25)$$

Para $\eta_v = \mathrm{a}_v \psi^{\frac{3}{2}} \eta \sin\phi_{dv}$.

Assim exposto, demonstra-se que um fluido newtoniano com partículas sólidas inertes, na região macro-viscosa, possui ainda comportamento newtoniano, porém com um coeficiente de viscosidade modificado (η_v).

Para a faixa que compreende regime inercial de grãos, esse pesquisador determinou a tensão de cisalhamento (Equação 25). Essa tensão é ligeiramente maior, pois a ela é somada uma tensão cisalhante residual devido a uma transferência de "*momentum"* dentro do fluido intersticial. Assim, tem-se:

$$\tau = \mathrm{a}_i \rho_s (\psi d)^2 \left(\frac{dU_B}{dy}\right)^2 \sin\phi_{di} \text{, sendo:} \qquad (26)$$

a_i : Constante numérica (determinada experimentalmente como 0,13); e

ϕ_{di} : Ângulo dinâmico de atrito interno para o regime inercial de grãos.

A expressão dada pela Equação 26 é conhecida como modelo de dilatância fluida de Bagnold. Pode-se notar que a tensão é proporcional ao quadrado da taxa de deformação e, pode ser escrito como:

$$\tau = \eta_i \left(\frac{dU_B}{dy} \right)^2 \qquad (27)$$

Para $\eta_i = \mathrm{a}_i \rho_s (\psi d)^2 \sin \phi_{di}$

II.1.4.2 - Estudos de efeitos de inércia para fluidos intersticiais não-newtonianos

A metodologia apresentada anteriormente tem como fluido base (matriz intersticial viscosa que lubrifica o movimento dos grãos) um fluido newtoniano. Quando ocorre a adição de grãos em uma matriz fluida do tipo não-newtoniana, o comportamento reológico deve ser semelhante à adição de partículas em um fluido newtoniano, adaptada a nova matriz hiperconcentrada.

A introdução de materiais inertes dentro de uma matriz fluida, newtoniana ou não, causa uma mudança no comportamento reométrico da nova mistura. O tipo de mudança causada pela adição de partículas depende da interação destas entre si, de sua geometria, da matriz fluida e do regime de escoamento. O que acontece ao se cisalhar a suspensão de água+argila+inertes? O dispositivo cisalhante adotado aqui é uma célula do tipo Couette (cilindros coaxiais).

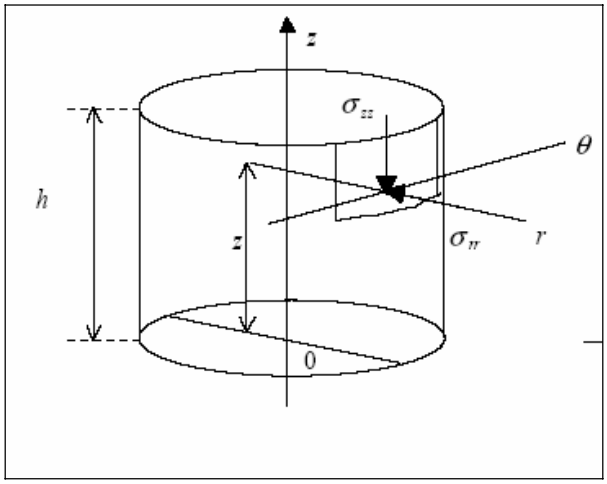


Figura 05: Esquema de princípio da célula de cisalhamento

Durante o repouso, devido à sedimentação das partículas inertes, as partículas se juntam umas as outras formando, dessa forma, uma rede de contatos diretos (atritiva). O comportamento macroscópico esperado é o

mesmo de um solo granulado: deve-se, por conseguinte, considerar que a tensão de cisalhamento dependa linearmente da tensão (através do ângulo de atrito) e não da velocidade de cisalhamento.

Quando a velocidade cisalhante aumenta, os efeitos inertes e viscosos do líquido intersticial manifestam-se progressivamente. Este efeito é conhecido e denominado "ressuspensão viscosa" e foi descrito por Acrivos e Leighton (1987). Para suspensões muito concentradas de partículas inertes, a força hidrodinâmica preponderante sofrida pelas partículas resulta do contato lubrificado entre duas partículas vizinhas separadas de uma distância ζR (sendo R o raio das partículas e ζ a distância média entre as superfícies das partículas). Esta força escreve-se como:

$F = 3\pi\ \mu_d Rc/(2\zeta)$, sendo: (28)

c: Velocidade relativa das duas partículas; e

μ_d: Viscosidade (dinâmica) do líquido intersticial.

Como não se conhece exatamente a velocidade relativa das partículas, faz-se a aproximação:

$c = O\ (R\omega)$, sendo: (29)

ω: Velocidade angular de rotação.

Uma vez que os contatos sejam lubrificados por um fluido newtoniano, o comportamento macroscópico da suspensão é esperado ser o de um líquido newtoniano, cuja viscosidade macroscópica é função principalmente da concentração sólida: $\mu_{eq} = \mu_{eq}(\phi)$.

Em ensaios com misturas compostas de água+argila+areia fina, Lledo (2003) observou os seguintes comportamentos:

- Até certa velocidade de rotação, a mistura apresenta o mesmo comportamento do fluido intersticial (composto de água+argila),

analogamente esta seria a região descrita por Bagnold como macro-viscosa (Figura 06);

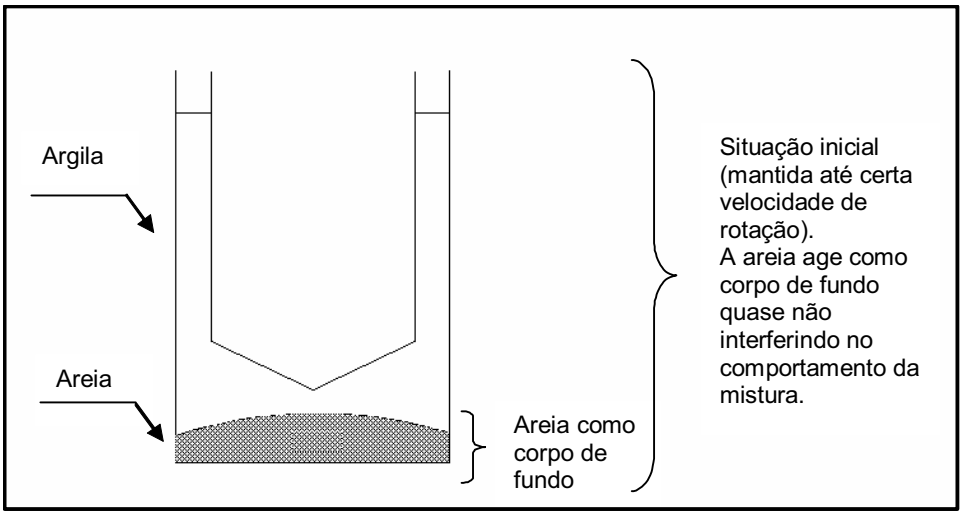


Figura 06: Estado inicial dentro da "Jaqueta" – antes de ser atingida a velocidade para a ressuspensão (Kiryu, 2003)

– Acima de uma velocidade crítica, o fluido seria capaz de transmitir quantidade de movimento aos grãos, pondo-os em movimento, esta seria o regime inercial de grãos (Figura 07).

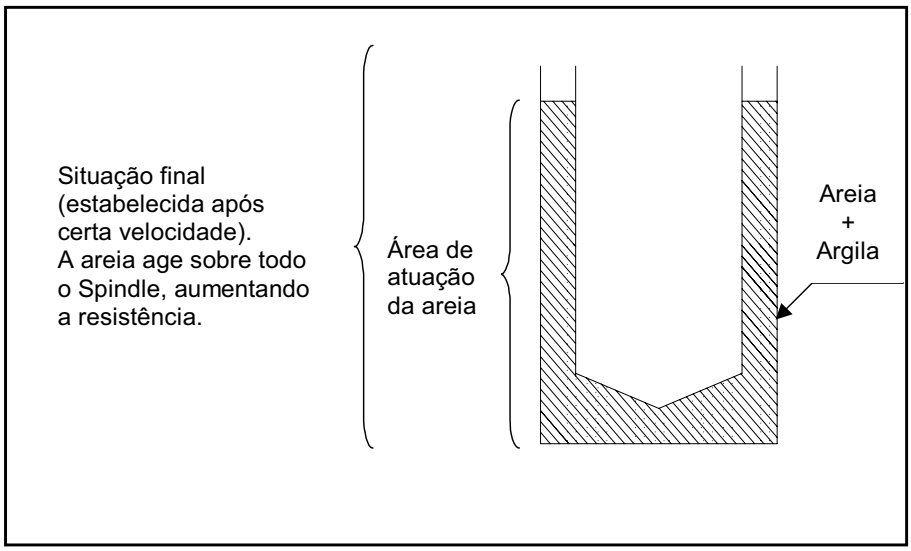


Figura 07: Estado final dentro da "*Jaqueta*" – após atingir a velocidade para ressuspensão (velocidade crítica) (Kiryu, 2003)

Esse comportamento causaria uma anomalia na curva de escoamento semelhante a um efeito dilatante (no modelo de Bagnold essa seria a causa da relação quadrática entre a taxa de deformação e a tensão). A Figura 08 mostra esta anomalia.

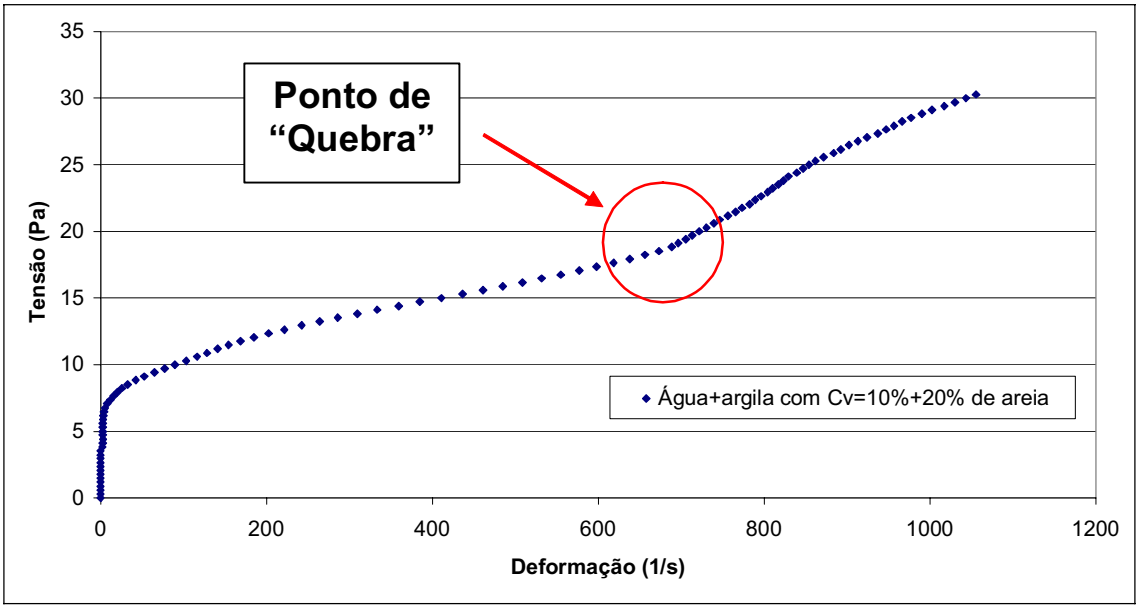


Figura 08: "Ponto de quebra" – ponto a partir do qual para uma mesma Deformação se requer uma maior Tensão

O ponto onde ocorre a "quebra" depende da viscosidade do material, fluidos mais viscosos apresentam a anomalia em velocidades de rotações mais altas, da mesma forma, em fluidos menos viscosos, ela ocorre em velocidades mais baixas.

Também foi observada uma evolução no comportamento das viscosidades em relação à velocidade de rotação no reômetro e, assim, puderam ser vistas várias etapas dentro de misturas que contêm frações sólidas. Essas etapas (Figura 09) foram:

1. Movimentação do material granular: Nessa fase a tensão aplicada à amostra é utilizada para movimentar o material granular depositado, movimentando-o como corpo de fundo.

Na mistura ocorre a diminuição da viscosidade em função da taxa de deformação, assim como é esperado em um fluido visco-plástico.

2. Constância da viscosidade: Ocorre o aumento da velocidade, de rotação do "*spindle*", porém mantendo a viscosidade constante, isso ocorre porque a velocidade desenvolvida não é suficiente para ressuspender o material depositado.

3. Aumento da viscosidade: Com o progressivo aumento da velocidade, a rotação alcança o ponto em que a velocidade de rotação é suficiente para a ressuspensão das partículas sólidas mais leves e, dessa forma, coloca partículas em contato com o "*spindle*" que antes não estavam, o que acarreta o aumento da viscosidade aparente.

É importante lembrar que a ressuspensão ocorre por fases. Assim, para misturas de água+areia fina, ao fluido atingir uma certa viscosidade, a viscosidade é estabilizada, porém aumentando a velocidade até a próxima velocidade limite deve-se ocorre uma nova ressuspensão.

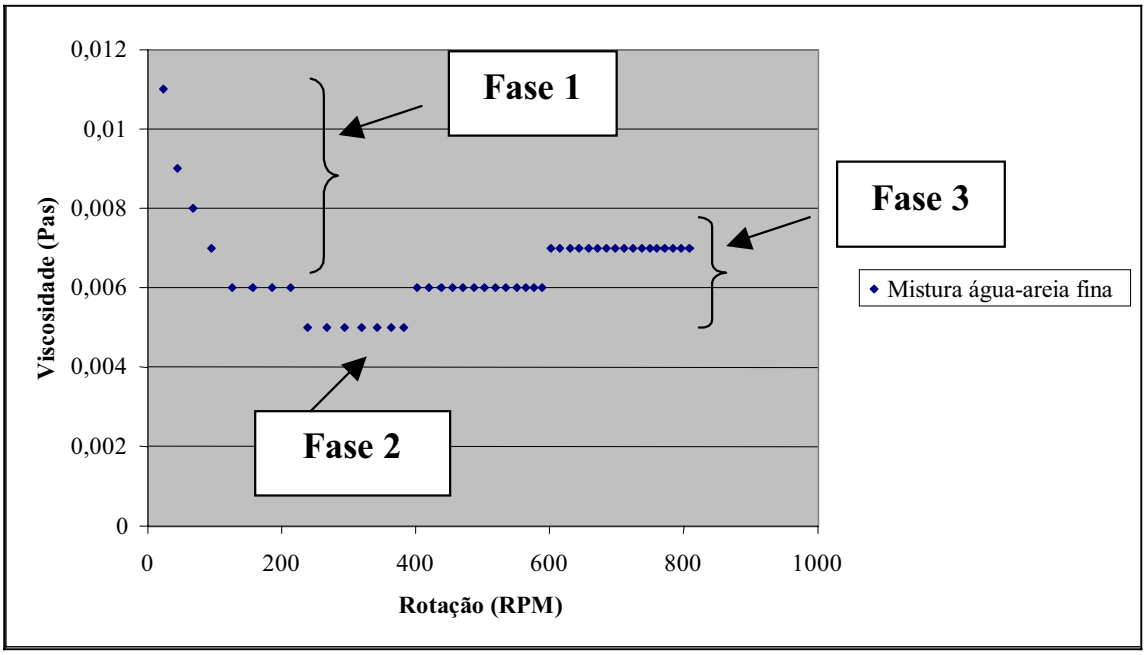


Figura 09: Demonstração das fases de agitação de mistura água+areia (Kiryu, 2003)

II.1.4.3 - Efeito da distribuição granulométrica sobre as propriedades macroscópicas de uma suspensão concentrada

A maior parte das suspensões naturais é caracterizada por um grande espectro de dimensões de grãos. A natureza e a intensidade das interações fluido/partícula e partícula/partícula são dependentes da dimensão dos grãos de modo que não é possível determinar seu comportamento, em escala microscópica, simplesmente a partir do conhecimento das interações entre esses elementos.

De um ponto de vista prático, o problema é de importância por vários motivos, notadamente para problemas referentes às lamas presentes em

ondas de cheia, por exemplo. Uma primeira pergunta é relativa à pré-determinação do comportamento de uma lama, a partir do simples conhecimento da granulometria e de ensaios de identificação. A segunda pergunta é ligada à determinação das características mecânicas através de reometria: só uma parte fina da granulometria pode ser colocada no *"gap"* do reômetro (disponível na Unesp/Ilha Solteira). Assim exposto, coloca-se a dificuldade de extrapolar as propriedades medidas de uma amostra reduzida para um material completo e complexo.

Este problema tem sido abordado geralmente por um ponto de vista fenomenológico. Assim, Wildemuth e Williams (1985) sugeriram que a tensão crítica de uma suspensão com granulometria vasta fosse dependente da concentração máxima de grãos.

Esses pesquisadores mostraram que, para qualquer suspensão, devia existir uma faixa de concentração sólida $[\phi_0, \phi_\infty]$ para a qual a suspensão ficava plástica. Nesta faixa, a tensão crítica τ_c exprime-se em função da concentração sólida, a saber:

$$\tau_c(\phi) = \sqrt[m]{B\left(\frac{\phi/\phi_0 - 1}{1 - \phi/\phi_\infty}\right)}\text{, sendo:} \qquad (30)$$

ϕ : Concentração sólida da mistura;

ϕ_∞: Concentração máxima para forte cisalhamento;

ϕ_0: Concentração crítica de sedimentação (formação de uma rede de contato de partículas), este valor é de difícil determinação prática; e

B, m: Parâmetros a serem calibrados experimentalmente.

Uma outra abordagem, relativamente simples, foi proposta por Sengun e Probstein (1989). Ela pode ser resumida em quatro pontos principais:

(i) Uma suspensão com uma larga distribuição granulométrica pode ser considerada, numa primeira aproximação, como bimodal (apresentar 2 fases), com uma fração fina que agrupa as partículas coloidais e uma fração grossa constituída das partículas não coloidais;

(ii) A parte fina misturada à água constitui o líquido intersticial;

(iii) O comportamento macroscópico é ditado pelo líquido intersticial;

(iv) A fração grossa influencia o comportamento macroscópico apenas por um crescimento da viscosidade.

Os ensaios realizados no Laboratório de Hidrologia/Hidrometria da Unesp/Ilha Solteira, apresentados nesta Dissertação de mestrado, estão em consonância com a proposta de Sengun e Probstein (1989).

II.1.4.3.1 - Variação da tensão crítica com a concentração sólida

Um problema clássico para as suspensões coloidais é determinar como se varia a tensão crítica em função da concentração sólida.

Na literatura (Ancey, 2002) encontra-se que, para as argilas, foi mostrado experimentalmente que a tensão critica τ_c varia muito rapidamente com a concentração sólida ϕ ($\tau_c \propto \phi^n$), com *n* da ordem de 5.

Vários modelos teóricos foram desenvolvidos para justificar esta variação em lei potência. Existem alguns fatores “complicadores” para a determinação teórica de τ_c, dentre eles, citemos: a agregação de partículas, presença de várias forças (força iônica, força Van der Waals, etc.), efeito Browniano, etc.

Vários modelos aproximados foram construídos para quando um tipo de interação em particular predomina. Assim, Kapur e Scales (1997); e Zhou et.al. (1999) desenvolveram um modelo de campo médio quando as interações de Van der Waals predominam. Esses autores chegaram a seguinte relação:

$\tau_c(\phi) = K_a\left(\frac{\phi}{1-\phi}\right)^n \frac{1}{d^2}$, com $K_a = 3,1Ab/(24\pi\zeta)$, sendo: (31)

b, n: Parâmetros a serem determinados;

A : Constante de Hamaker;

d : Diâmetro das partículas; e

ζ : Distância média entre duas partículas.

Neste tipo de modelo, a dispersão necessariamente é floculada (predominância das forças atrativas de Van der Waals). Apresenta-se então como uma mistura de partículas agregadas (flocos), os agregados interagem entre si de maneira fraca. Segundo esses pesquisadores, é a existência destas relações entre agregados que confere um caráter plástico à dispersão. Como efeito, para cisalhar a suspensão, é necessário quebrar as relações entre flocos.

Para misturas de concentrações baixas tem-se que $\tau_c \propto \phi^n$. O coeficiente *n* pode, além disso, estar ligado à dimensão fractal dos flocos (um parâmetro ligado à forma da partícula).

Para fortes concentrações, a dependência de τ_c no que diz respeito à ϕ é bem mais significativa porque há, cada vez mais, contatos entre flocos e a ruptura das suas ligações torna-se cada vez mais difícil. Porém, o que aconteceria se partículas grossas (não coloidais) fossem acrescentadas nos sólidos totais? A priori, pode-se esperar uma diminuição da tensão crítica porque o volume relativo ocupado pela fração fina é reduzido. Assim, a Equação 31 deve ser modificada em função dos sólidos inertes:

$\tau_c(\phi_f, \phi_g) = K_a\left(\frac{\phi_f}{1-\phi_f}\right)^n \frac{1-\phi_g}{d^2} + \Im(\phi_g)$, sendo; (32)

ϕ_g: Fração de sólidos grossa;

ϕ_f: Fração de sólidos fina; e

$\Im$: Função dos sólidos grossos.

A fim de melhor compreender o efeito da granulometria no caso de suspensões concentradas, Ancey (2002) realizou diversas experiências sobre líquidos que possuem esta natureza. O objetivo destas experiências foi examinar a relação entre interações locais, granulometria, e o comportamento macroscópico.

Os líquidos utilizados foram misturas de esfera de vidro ou de poliestireno em dispersões de caulinita ou de bentonita. Este pesquisador distinguiu dois tipos de propriedades: a transição entre o comportamento sólido e fluido (que passa pelo estudo da tensão crítica) e o comportamento em cisalhamento simples.

No que segue, para essa análise, será utilizada a seguinte notação: fração total ϕ_t ($\phi_t = \phi_f + \phi_g$). Os resultados obtidos foram plotados na Figura 10. Com estes dados, o pesquisador estimou a variação da tensão crítica de uma suspensão de esfera de vidro e de caulinita em função da concentração total em um diagrama monologarítimo.

A tensão crítica foi medida com a ajuda do método de Pashias ("slump test"). No caso de uma suspensão de caulinita ($\phi_g = 0$), o modelo da Equação 31 permite descrever corretamente a dependência de τ_c.

A suspensão de esfera de vidro comportava uma população bimodal; ξ é a fração ocupada pelas pequenas esferas. Observa-se que inicialmente a tensão crítica diminui quando se começa a acrescentar esferas. No entanto, este decréscimo não se mantém quando se continua a acrescentar esferas. No caso da Figura 10, para concentrações totais superiores a 55%, a tensão crítica aumenta com a concentração e, notadamente, a taxa de crescimento é semelhante ao da dispersão de caulinita (de acordo com a Figura 10 para a dispersão de caulinita: $K_a = 1{,}43\ 10^{-7}$ e $n = 5{,}15$).

Ancey (2002) observou que a distribuição granulométrica tem efeitos complexos na tensão crítica. Segundo ele, tem-se:

- Para concentrações moderadas, observa-se que a tensão crítica era independente da dimensão das partículas;

- Para altas concentrações o inverso foi observado: quanto mais a mistura era rica em pequenas esferas, mais a tensão critica aumentava.

Uma possível explicação para estas observações é considerar um crescimento sensível das interações entre partículas grossas. Como estas partículas não são ativas, apenas efeitos indiretos (como por exemplo, deposição das partículas argilosas na superfície das esferas de vidro) poderiam ser responsáveis por um aumento da tensão crítica. No entanto, o cálculo das ordens de grandeza destes efeitos indiretos não permitem determinar a taxa de crescimento da tensão crítica e, sobretudo, de explicar porque esta taxa é idêntica à da caulinita.

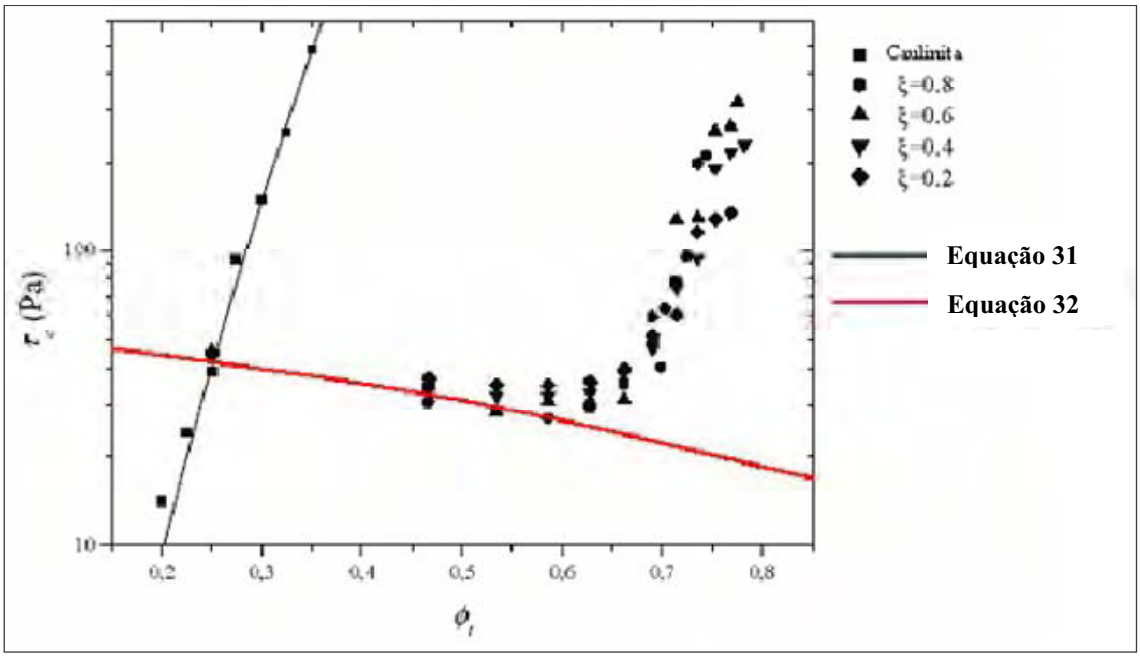


Figura 10: Variação da tensão crítica com a concentração sólida. A suspensão de esfera era composta de esfera de 1 e 3 mm de diâmetro. A fração relativa de pequenas esfera é ξ. A concentração inicial de caulinita para as misturas caulinita+esferas era 25%

Naturalmente é falso pensar que tudo se passa como se uma partícula grossa cercada de partículas coloidais comportasse-se, por sua vez, como uma partícula coloidal.

Pode-se também suspeitar que para o caso das altas concentrações, forças de lubrificação apareçam na rede de contato de partículas. Como se trata de forças de contato, a tensão macroscópica resultante é ainda mais importante quando o número de contato é elevado. Isso explicaria, por conseguinte, a observação precedente segundo a qual a tensão crítica é ainda maior quando a mistura é bimodal e rica em partículas finas. Segundo Ancey (2002), a força de contato $\mathbf{f}$ deveria se escrever sob a forma:

$|\mathbf{f}| \approx \tau_c \zeta^{-2/3}$, sendo: (33)

ζ: Distância média entre a superfície das partículas.

Com o aumento da fração inerte nos sólidos totais da mistura, a tensão crítica da amostra deve diminuir. Esse fato é sustentado pela hipótese de que a tensão crítica é um efeito dos sólidos coloidais.

O efeito do aumento da tensão crítica observado por Ancey também foi observado por Kiryu (2005), durante alguns testes reométricos de misturas possuindo uma quantidade elevada de sólidos inertes.

Após análises de resultados e discussões com outros grupos de estudos de reologia, puderam-se enumerar as seguintes conclusões: o aumento da tensão crítica, para misturas ricas em materiais granulares, foi propiciado pela rede de contatos formada pelos grãos no interior do fluido intersticial.

Considerando o aumento excessivo do número de contatos diretos entre os grãos, pôde-se concluir que esses contatos entre partículas também deveriam ocorrer com a mistura em repouso. Assim sendo, uma rede de contatos não-lubrificados entre os grãos deveria ser formada, sendo esta rede a responsável pelo aumento da tensão crítica da mistura, ou ainda diz-se que a fase da mistura teria se modificado, de modo que ao invés de água contendo material inerte ter-se-ia uma mistura composta de grãos adicionados de água.

Assim as considerações de Ancey seriam corretas, porém para misturas diferentes: no caso de uma mistura composta de água+sólidos quando a fração de sólidos inertes diminuírem (em relação ao volume total de sólidos, ou seja, finos+grãos) a tensão crítica da mistura deveria diminuir. Num segundo caso, uma mistura composta de muitos sólidos inertes adicionados de uma suspensão de água+argila de baixa concentração, o aumento da fração granular no volume total de sólidos aumenta a tensão crítica da mistura (em função da consolidação da rede de contato direto entre os grãos).

II.1.4.4 - Propriedades reológicas em função da granulometria

No caso presente, as partículas finas (argila) e a água formam uma dispersão coloidal que constitui o líquido intersticial. Se a tensão crítica deste líquido intersticial é suficientemente grande, pode gerar uma resistência à

sedimentação das partículas. Considerando duas partículas grossas cercadas de líquido, admite-se que:

(i) O líquido intersticial comporta-se como sólido elástico quando o estado de tensão não excede à tensão crítica de plasticidade;

(ii) A tensão crítica de plasticidade pode ser descrita por um parâmetro de Von Mises;

(iii) A tensão crítica de plasticidade e a tensão crítica são equivalentes.

Dessa forma, a resistência à compressão que o líquido sofre é $2\tau_c$.

Trata-se aqui de uma extensão da discussão do filme de líquido intersticial entre as duas partículas sujeitas a uma força devida ao peso submerso das partículas $(\rho'=\rho_s-\rho_f)$. Pode-se, dessa forma, definir uma razão (N) entre a força de gravidade ($4\rho' gd/3$) e a resistência do líquido ($2\tau_c$), a saber:

$$\mathbf{N} = \frac{2\rho' gd}{3\tau_c}, \text{ sendo:} \qquad (34)$$

d: Diâmetro dos grãos pouco reagentes.

Quando **N** < 1, o líquido intersticial opõe-se à sedimentação das partículas, conseqüentemente, as partículas não podem entrar em contato direto. Do ponto de vista reológico isso quer dizer que, dado que todos os contatos são lubrificados pelo líquido viscoplástico, o comportamento macroscópico deve ser igualmente viscoplástico.

Contrariamente, quando **N** > 1, os contatos diretos podem formar-se por sedimentação. Sob certas condições de escoamento (por exemplo, a baixa velocidade de cisalhamento) uma rede de partículas em contatos atritivos pode ser criada e o comportamento macroscópico deveria ser atritivo.

Para forte velocidade de cisalhamento, os contatos diretos são quebrados e dão lugar a contatos lubrificados.

Partindo do princípio que em amostras nas quais ocorrem a sedimentação também ocorrem a ressuspensão, a Figura 11 exemplifica dois

curvas, uma com sedimentação (indicada pela ressuspensão) com **N** > 1 e uma curva na qual não ocorre sedimentação com **N** < 1.

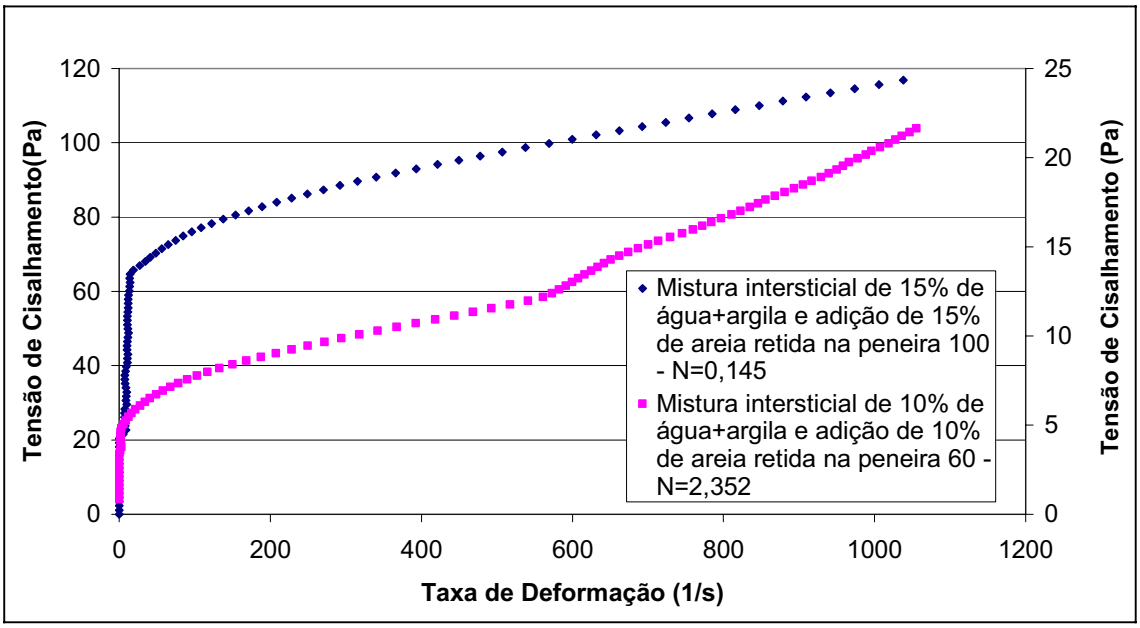


Figura 11: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de misturas com N < 1 e N > 1

Entretanto o estudo proposto por Ancey (2002), relativo a efeitos de sedimentação, considera o comportamento do fluido intersticial totalmente independente de possíveis modificações causadas pela adição de partículas inertes no interior do fluido intersticial.

Além disso, com o inicio do cisalhamento ocorre a quebra da tensão crítica e, com isso, a Equação 34 não deve funcionar. Entretanto, para amostras com **N** < 1 (não ocorrência de sedimentação) foi observado que a queda da viscosidade do fluido intersticial devido ao aumento da taxa de deformação é muito menor que a ressuspensão dos grãos (também devido ao aumento da taxa de deformação), com isso a curva de escoamento da amostra é similar a de um fluido visco-plástico.

NOTA: Retoma-se essa discussão quando da apresentação dos ensaios reométricos realizados com o objetivo de melhor entendimento dos efeitos de sedimentação e ressuspensão no capítulo "Resultados e Discussões".

II.2 - Escoamento com superfície livre de misturas concentradas

No escoamento de uma mistura sólido+líquido, quantidade de movimento e energia são transferidos por diferentes formas de interação entre as partículas sólidas e o meio líquido. Estas interações são:

1. Interações sólido+líquido: As interações sólido+líquido podem ocorrer através de forças de arrasto e forças de empuxo;
2. Interações sólido+sólido: Partículas sólidas podem interagir com outras através de colisões, atrito, coesão e interligações;
3. Interações líquido+líquido: Tensões de cisalhamento viscosas e turbulentas são resultantes das interações de moléculas de líquido.

Contatos entre partículas sólidas em um escoamento sólido+líquido é um dos mecanismos responsáveis pela transmissão de quantidade de movimento e de energia de um ponto da mistura para outro.

Para baixas concentrações de partículas sólidas e altas taxas de deformação, os contatos ocorrem em tempos muito curtos e podem ser considerados como colisões. Se as partículas não possuem comportamento perfeitamente elástico, a energia é dissipada em cada uma das colisões.

Por outro lado, quando a concentração de partículas é alta e as taxas de deformações são baixas, os contatos entre as partículas ocorrem em um tempo finito e, dessa forma, são tratados como deslizamentos e rolagens relativas entre as partículas. Neste caso, as forças atritivas são dominantes e a energia é dissipada por atrito.

Para um caso intermediário, todos os contatos citados anteriormente são possíveis e, assim, a transferência de quantidade de movimento e de energia podem ocorrer por deslizamento e rolagem e, também, por colisões.

O líquido intersticial (matriz fluida que lubrifica os movimentos) também contribui para a transferência de quantidade de movimento. Viscosidade (tensões viscosas) e Turbulência (tensões de Reynolds) são outros mecanismos responsáveis pela transferência de quantidade de movimento no interior do fluxo de uma mistura sólido+líquida. O grau de importância que cada uma destas duas últimas formas de dissipação (viscosa ou turbulenta), assim

como a importância da colisão e do atrito entre os grãos, depende do regime de escoamento.

Obviamente, para altas concentrações de partículas sólidas e baixas taxas de deformação, a viscosidade do líquido que compõe a mistura é muito importante, porém o efeito da turbulência não é muito significante. Contudo, para baixas concentrações e altas taxas de cisalhamento, a turbulência se torna muito mais importante.

A Tabela 01 mostra a importância de cada um dos mecanismos comentados anteriormente na transferência de quantidade de movimento no escoamento de uma mistura sólido+líquido, cujo efeito final deve ser a soma dos mecanismos sólidos e líquidos.

Tabela 1: Importância relativa dos diferentes mecanismos de transferência de quantidade de movimento em um escoamento de uma mistura sólido+líquido

Fase	Mecanismo	Dois casos extremos de escoamento	
		Alta taxa de deformação e baixas concentrações	Baixas taxas de deformação e altas concentrações
Sólido	Colisão	alta	baixa
	Atrito	baixa	alta
Líquido	Viscosidade	baixa	alta
	Turbulência	alta	baixa

II.2.1 - Teoria de Bagnold

Dentre as teorias para caracterizar os escoamentos de superfície livre com presença de grãos tem-se a teoria de Bagnold.

II.2.1.1 - Escoamento para o regime inercial de grãos

De acordo com Bagnold (1954), a tensão de cisalhamento para a região inercial de grãos é dada pela Equação 26.

A tensão cisalhante aplicada a uma distância y do fundo de um canal é dada por:

$\tau_a = g \sin\theta \int_y^h \rho_m(y) dy$, sendo: (35)

$\rho_m(y)$: Massa específica da mistura a uma distância y do fundo $[\phi\rho_s+(1-\phi)\rho_f]$;

ρ_f : Massa específica do fluido;

θ : Declividade do canal; e

h : Profundidade total do escoamento.

Pelas Equações 26 e 35, a tensão de cisalhamento aplicada é igual à tensão resistente. Igualando as duas equações e integrando com as considerações de não-deslizamento na parede (fundo) e uma concentração constante de sólidos em toda a profundidade, é facilmente demonstrável que:

$$U_B = \frac{2}{3} K_i \left[h^{\frac{3}{2}} - (h-y)^{\frac{3}{2}} \right], \text{ sendo:} \quad (36)$$

$$K_i = \left[\frac{\rho_m g \sin\theta}{a_i \rho_s (\psi D)^2 \sin\phi_{di}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

A Equação 36 foi utilizada por Takahashi (1981 e 1991) para modelar "*debris flows*" (escoamentos de detritos). A velocidade média pode ser calculada como:

$$\overline{U}_B = \frac{3}{5} K_i h^{\frac{3}{2}} \quad (37)$$

Baseado na Equação 36 a velocidade superficial (máxima velocidade – U_{Bs}) é definida como:

$$U_{Bs} = \frac{2}{3} K_i h^{\frac{3}{2}} \quad (38)$$

Dividindo a Equação 36 pela Equação 38 tem-se a relação adimensional para o perfil de velocidade:

$$\frac{U_B}{\overline{U}_B} = 1 - \left(1 - \frac{y}{h}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{39}$$

II.2.1.2 - Regime macro-viscoso

Para a faixa macro-viscosa do escoamento de uma mistura sólido+líquido, uma expressão similar pode ser determinada a partir de uma expressão apropriada para a tensão de cisalhamento interna. Considerando novamente uma concentração uniforme de sólidos em um fluido viscoso, escoando em uma superfície inclinada com profundidade constante, Bagnold (1954) determinou experimentalmente a expressão da tensão de cisalhamento total em um regime macro-viscoso (Equação 24).

Dessa forma, uma tensão de cisalhamento aplicada a uma profundidade (*h-y*) abaixo da superfície livre pode ser determinada como:

$$\tau_a = g \sin\theta \int_y^h \rho_m(y) dy \tag{40}$$

Igualando as duas expressões é possível obter o perfil de velocidade para um escoamento de uma mistura sólido+líquido em canal aberto no regime macro-viscoso. O perfil de velocidade para essa região é dado como:

$$U_B = K_v \left(hy - \frac{y^2}{2} \right) \tag{41}$$

Sendo; $K_v = \dfrac{\rho_m g \sin\theta}{\mathrm{a_v} \psi^{\frac{3}{2}} \eta sen\phi_{dv}}$

Para este perfil a velocidade média pode ser determinada como:

$$\overline{U}_B = \frac{1}{3} K_v h^2 \tag{42}$$

E a velocidade na superfície livre como:

$$U_{Bs} = \frac{1}{2} K_v h^2 \tag{43}$$

Comparando as Equações 41 e 42 é possível determinar uma velocidade adimensional mostrada na Equação 44.

$$\frac{U_B}{\overline{U}_B} = 3\left(\frac{y}{h} - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) \tag{44}$$

A teoria de Bagnold (1954) é uma boa aproximação para a determinação de velocidade de escoamento de superfície livre, porém foi escrita para misturas de fluidos intersticiais de comportamento newtoniano com partículas sólidas inertes. O parâmetro η indica a viscosidade absoluta do fluido intersticial como uma constante; entretanto este valor, para fluidos não-newtonianos, é uma função da taxa de deformação ($\eta = \eta(\dot{\gamma})$).

Além disso, alguns parâmetros como ângulo dinâmico de atrito interno (ϕ_{di}), e a distância de separação entre duas partículas esféricas (ς), são difíceis de serem determinados.

II.2.2 - Escoamento de um fluido hiperconcentrado sobre um plano inclinado

Pretende-se neste item retomar o equacionamento de um fluido hiperconcentrado escoando sobre um plano inclinado em condições de plano infinito (sem efeito das laterais do canal), condição essa que pode ser atingida quando a relação profundidade/largura << 1, conforme desenvolvido por Lledo (2003).

Nesta seção será considerado o escoamento laminar de um fluido homogêneo e incompressível, com comportamento reológico tipo Herschel-Bulkley, em um plano inclinado com inclinação θ em relação à horizontal. Este tipo de escoamento foi estudado por Howard (1963) e Paslay e Slibar (1958), porém com fluidos Binghamiamos (fluidos que apresentam viscosidade constante com a presença de tensão crítica).

Um esquema de escoamento, em coordenadas cartesianas, em plano inclinado, no qual o eixo *x* está no sentido do escoamento pode ser visualizado na Figura 12.

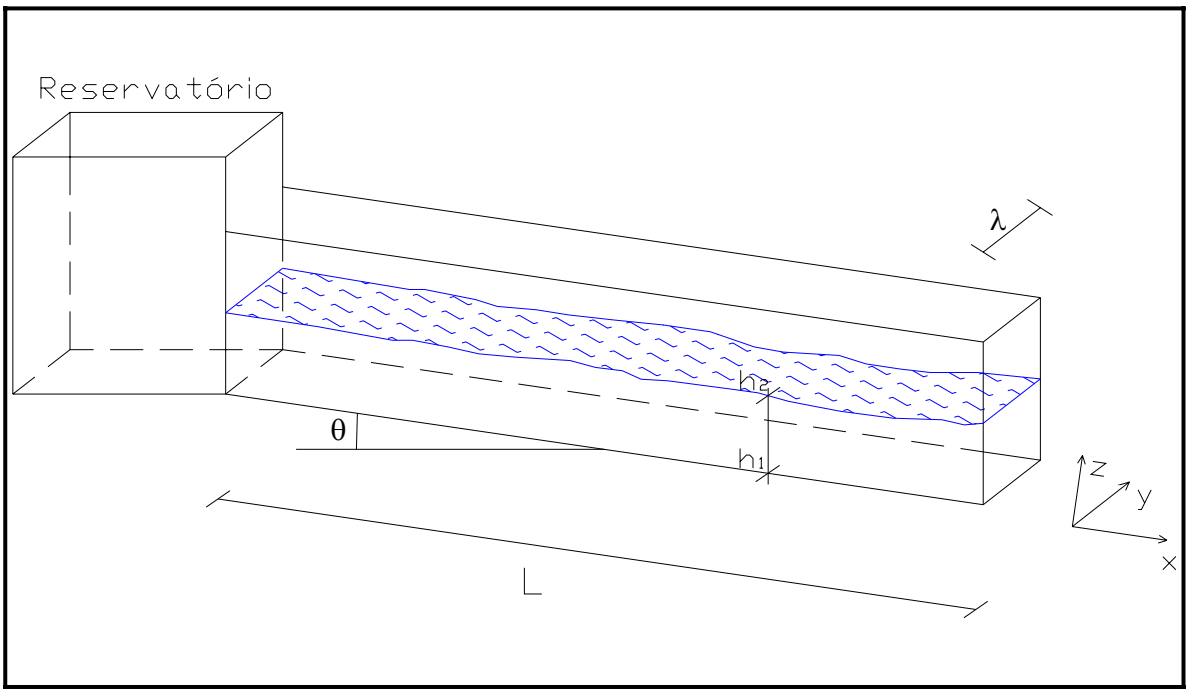


Figura 12: Esquema com as características do escoamento e do canal: h_1, h_2, L, θ, λ e os eixos x, y e z.

Supondo um escoamento uniforme e permanente, a velocidade *u* não depende de *x* e *y*, devido a simetria do problema em relação ao plano (*x,z*) a componente de velocidade em *y* (*w*) é nula, com a componente de velocidade em *z* (*v*) nula no fundo do canal (*v=0)*.

A única componente de velocidade não nula está em *u* esta na direção *x* e depende de *z*. Segundo Coussot (1997), conforme verificado por Lledo (2003), esta distribuição de velocidade corresponde ao caso de cisalhamento simples e para fluidos do tipo Herschel-Bulkley, tem-se:

$$\tau_{xx} = \tau_{yy} = \tau_{zz} = 0\,;\; T_{xz} = T_{yz} = 0\,;\; T_{xz} = T_{zx} = T(z)\,;\; p = p(z) \qquad (45)$$

III.2.2.1 - Modelagem matemática para escoamento de superfície livre de fluidos hiperconcentrados

Segundo Lledo (2003), a determinação das equações hidrodinâmicas para um escoamento hiperconcentrado sobre um plano infinito na nova reologia de Herschel-Bulkley seguiu, em grandes linhas, a seguinte metodologia:

1. Definição da reologia segundo o modelo de Hershel-Bulkley (Equação 75).
2. Utilização das equações clássicas da hidrodinâmica – Conservação da massa e equação da quantidade de movimento (QDM).

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad \text{(conservação da massa)} \qquad (46)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial u^2}{\partial x}+\frac{\partial u.v}{\partial y}+\frac{\partial u.w}{\partial z}=\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial T_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial T_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial T_{xz}}{\partial z}\right) \qquad \text{(QDM em x)} \qquad (47)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial u.v}{\partial x}+\frac{\partial v^2}{\partial y}+\frac{\partial v.w}{\partial z}=\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial T_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial T_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial T_{yz}}{\partial z}\right) \qquad \text{(QDM em y)} \qquad (48)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{\partial u.w}{\partial x}+\frac{\partial v.w}{\partial y}+\frac{\partial w^2}{\partial z}=-g+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial T_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial T_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial T_{zz}}{\partial z}\right) \qquad \text{(QDM em z)} \qquad (49)$$

3. Tratamento dos tensores e de seus componentes, presentes no equacionamento anterior.
4. Tratamento das condições de contorno: impermeabilidade no fundo e na superfície livre, tensões no fundo, etc.
5. Adimensionalização das equações obtidas nos passos 2,3 e 4, a partir de escalas convenientes.
6. Promediação das equações admensionalizadas no passo 5 em via de obtenção do sistema “shallow water” na nova reologia em questão. As equações "shallow water" podem ser obtidas a partir da integração, na vertical, das equações de Navier-Stokes, às quais foi adicionada uma lei de comportamento reológico do tipo Herschel-Bulkley.

Essa metodologia foi utilizada por Lledo (2003) com bons resultados quando da determinação do escoamento de uma mistura fluida formada de água+argila caulinítica.

Considerando que o comportamento reológico da mistura segue o comportamento da mistura intersticial, espera-se que esta metodologia seja aplicável e que forneça resultados satisfatórios para o presente trabalho.

II.2.3 - Dinâmica do escoamento de misturas

II.2.3.1 - Escoamento uniforme para fluido de propriedades não-newtonianas

O sistema diferencial "shallow water" 2D (Lledo, 2003) se escreve na seguinte forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial \bar{u}h}{\partial x}+\frac{\partial \bar{v}h}{\partial y}=0 \tag{50}$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{gh^2}{2}+\alpha h(\bar{u})^2\right)+\frac{\partial}{\partial y}(\alpha h\bar{u}\bar{v})=-gh\frac{\partial h_1}{\partial x}+\frac{\tau_c}{\rho}\frac{\partial h}{\partial y}-\frac{\tau_p}{\rho}\frac{\bar{u}}{|u|} \tag{51}$$

$$\frac{\partial\left(h\bar{v}\right)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}(\alpha h\bar{u}\bar{v})+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{gh^2}{2}+\alpha h\left(\bar{v}\right)^2\right)=-gh\frac{\partial h_1}{\partial y}+\frac{\tau_c}{\rho}\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{\tau_p}{\rho}\frac{\bar{v}}{|u|} \tag{52}$$

Sendo: τ_p a tensão de parede (tensão entre o fluido escoamente e o fundo do canal)

Partindo da hipótese de um escoamento permanente, uniforme, laminar, de um fluido incompressível, em canal inclinado, baseado no modelo de Herschel-Bulkley e referenciando ao croqui da Figura 12, tem-se:

$$\tau=\rho g sen\theta(h-z) \tag{53}$$

$$\tau=\tau_c+k\dot{\gamma}^n \tag{54}$$

Inserindo a Equação 53 em 54 e resolvendo a equação diferencial, pode-se obter o perfil de velocidade u(z) para o fluido em questão:

$$u(z)=\frac{\alpha}{m+1}\left[{z_0}^{m+1}-(z_0-z)^{m+1}\right] \qquad \text{para } z \le z_0 \tag{55}$$

$$u(z)=u(z_0)=\frac{\alpha}{m+1}{z_0}^{m+1} \qquad \text{para } z_0 \le z \le h \tag{56}$$

Sendo $m=\frac{1}{n}$; $z_0=h-\frac{\tau_c}{\rho g sen\theta}$; $\alpha=\left(\frac{\rho g sen\theta}{k}\right)^m$

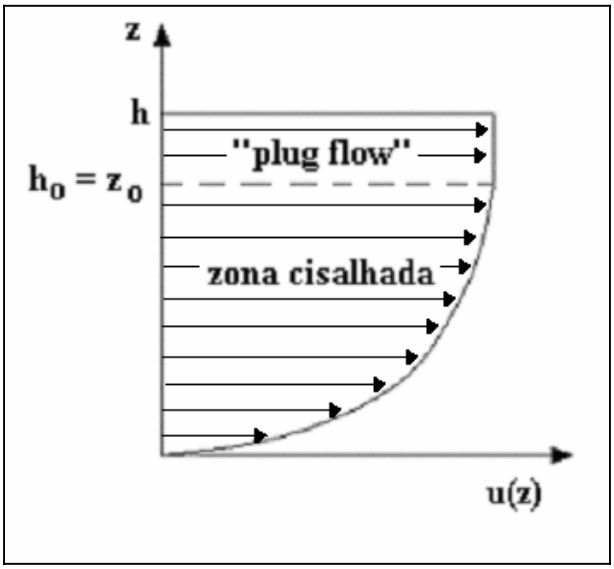


Figura 13: Perfil de Velocidade característico na vertical para um Fluido tipo Hershel-Bulkley

Trabalhando com os grupos adimensionais:

$$U=\frac{u(z)}{u(z_0)} \qquad ; Z=\frac{z}{z_0}$$

Tem-se:

$$U(Z)=1-(1-Z)^{m+1} \qquad \text{se} \quad Z \le 1 \tag{57}$$

$$U(Z)=1 \qquad \text{se} \quad 1 \le Z \le \frac{G}{G-1} \tag{58}$$

Sendo $G=\frac{\rho g h sen\theta}{\tau_c}$

Dessa maneira, pode-se analisar a distribuição do perfil de velocidades (Figuras 14 e 15).

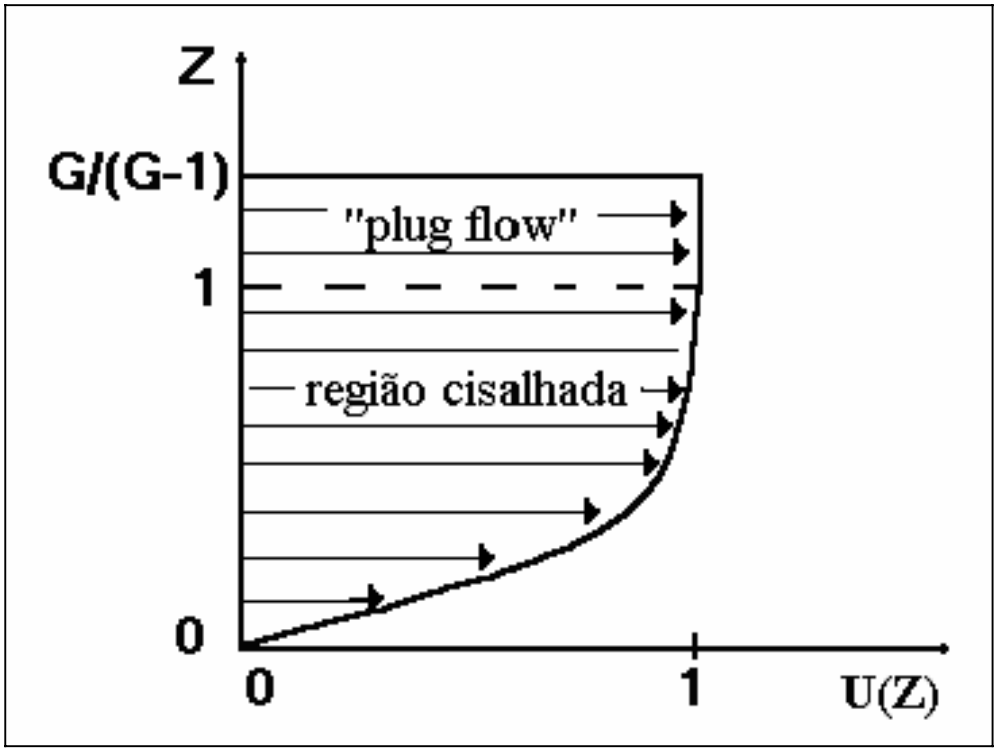


Figura 14: Perfil de velocidade característico para um Fluido tipo Herschel-Bulkley aplicadas as adimensionalizações

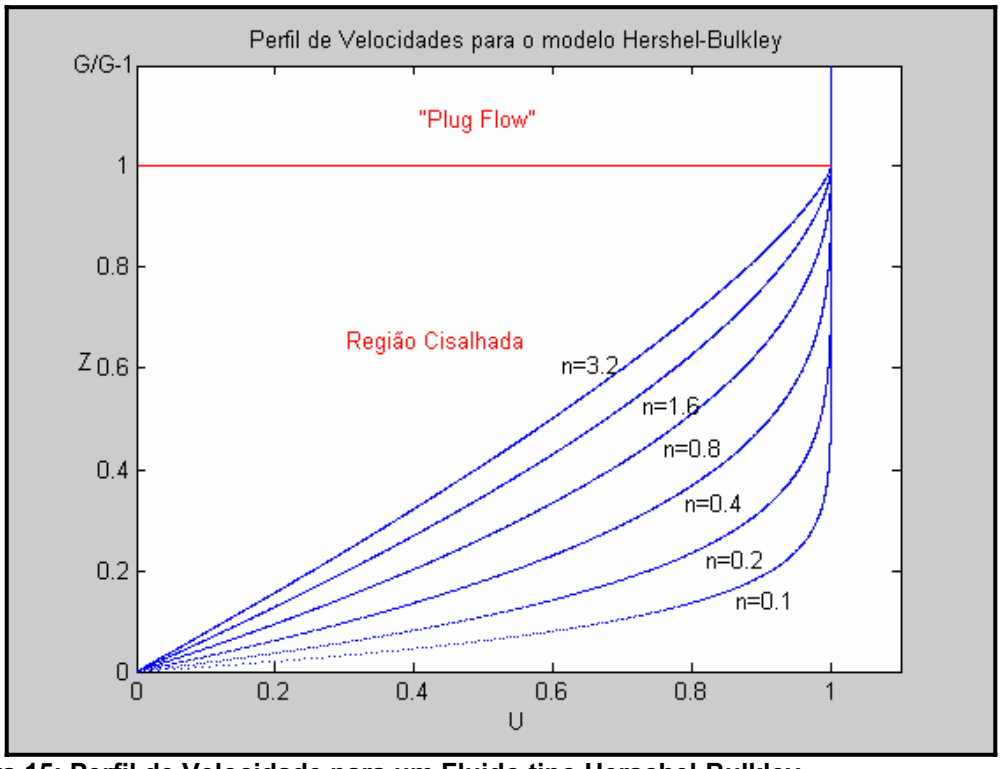


Figura 15: Perfil de Velocidade para um Fluido tipo Herschel-Bulkley

II.2.3.2 - Cálculo de q: vazão por unidade de largura do canal

$$q = \int_0^h u(z)dz = \frac{\alpha}{(1+m)}\left[\int_0^{z_0}\left[{z_0}^{(1+m)} - (z_0 - z)^{(1+m)}\right]dz + \int_{z_0}^{h}{z_0}^{(1+m)}dz\right] \quad (59)$$

Desenvolvendo-se, tem-se:

$$q = \frac{\alpha}{(1+m)}{z_0}^{(1+m)}\left[h - \frac{z_0}{(2+m)}\right] \quad (60)$$

Em se tratando de variáveis adimensionais, obtém-se:

$$H_b^{-m} = \frac{1}{(1+m)(2+m)}G^{-2}(G-1)^{(1+m)}\left[(1+m)G+1\right], \text{ sendo} \quad (61)$$

$$H_b = \frac{\tau_c}{k}\left(\frac{h}{U}\right)^n$$

H_b: Variável adimensional associada à vazão por unidade de largura, no modelo de Herschel-Bulkley.

II.2.3.3 - Determinação simplificada de uma lei de atrito para canal

De uma maneira global, tem-se da reologia:

$\tau = \tau_c + k\dot{\gamma}^n$ dividindo por τ_c:

$$\frac{\tau}{\tau_c} = 1 + \frac{k\dot{\gamma}^n}{\tau_c},$$

Fazendo-se: $\dfrac{\text{parcela da tensão crítica}}{\text{parcela da tensão viscosa}} = \mathrm{H_b}$

Decorre que:

$$H_b = \frac{\tau_c}{k\dot{\gamma}^n} = \frac{\tau_c}{k\left(\frac{U}{h}\right)^n} = \frac{\tau_c}{k}\left(\frac{h}{U}\right)^n$$

H_b: Número de Herschel-Bulkley.

Assim,

$$\frac{\tau}{\tau_c} = 1 + \frac{k\dot{\gamma}^n}{\tau_c} = 1 + H_b^{-1}$$

Mas em regime permanente e uniforme tem-se: $\tau = \rho g\, sen\theta (h - z)$.

No fundo (z = 0), o atrito é dado por: $\tau = \rho g sen\theta\, h$.

A partir da expressão de G, tem-se:

$\tau_p = G\tau_c$ (equação a ser calibrada através de dados experimentais) (62)

Ou ainda:

$\tau(z = 0) = \tau_p = \tau_c [\, 1 + H_b^{-1}\,]$ (lei de atrito tipo a ser estimada) (63)

A Equação 63 para determinação de tensão de parede (fundo) possui uma boa correlação apenas para casos nos quais a condição de largura infinita (lâmina/largura <<1) é verificada. Dessa forma, vem sendo pesquisada, na equipe de trabalho, uma lei de atrito mais adequada, para um canal de largura qualquer, ou seja, independente da condição de plano infinito. Tal lei deverá ser direcionada para uma correlação do tipo $\tau_p = \tau_c [\, 1 + k_1 H_b^{k_2}\,]$, com k_1 e k_2 a serem determinados a partir de ensaios experimentais. Resultados preliminares são apresentados em Maciel et. al. (2004).

Para essa Dissertação, uma bateria de ensaios foi realizada no canal residente com superfície livre com uma mistura homogênea de água+argila+inertes (areia fina). Trata-se de resultados preliminares, onde as leis de atrito prescritas deverão ser ainda melhor investigadas. Esses resultados são apresentados no Anexo II.

CAPÍTULO III - OBJETIVOS

Conforme já apresentados no preâmbulo deste trabalho e consubstanciados largamente pelo estado da arte, os objetivos desta dissertação são pontuados da seguinte forma:

- Investigar as variações dos parâmetros reológicos em misturas hiperconcentradas;

- Discutir a validade do modelo reológico de Herschel-Bulkley quando da introdução de material granular no seio do líquido não-Newtoniano;

- Tentar “desvendar” os efeitos de sedimentação e ressuspensão de componentes inertes, no fluido hiperconcentrado;

- Estudar a influência das características dos sólidos inertes no comportamento reológico global das misturas e, por fim,

- Estimar uma lei de atrito para esta natureza de mistura escoando em canal com superfície livre.

Assim exposto, o objetivo mais amplo desta proposta é conceber um modelo de lei de atrito para fluidos hiperconcentrados de matriz argilosa com presença de grãos em percentagens crescentes na mistura, quando do escoamento em canais abertos, e na mesma intensidade, atingir uma compreensão mais geral da mecânica desse tipo de suspensão, com compromissos de engenharia. No entanto, o objetivo mais específico é definir o domínio de validade do modelo reológico de Herschell-Bulkley.

CAPÍTULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS

IV.1 - Materiais utilizados

Os materiais utilizados nesta dissertação de mestrado serão descritos a seguir.

IV.1.1 - Argila

A argila utilizada para a confecção das misturas não-newtonianas (matriz fluida homogênea) tem as seguintes especificações:

Procedência: Minasolo Comércio e representações LTDA
Comercialização, representação e industrialização por terceiros de minérios e abrasivos.
Procedência – Minas Gerais – Brasil – N/ referência MTN – 200 e MTN – 325
Minério – Argila caulinitica refratária
Análise química típica % (conforme ficha técnica fornecida pela empresa em agosto de 2001).

SiO_2	46,00 a 48,00
Al_2O_3	37,00 a 38,50
Fe_2O_3	1,70 a 2,00
TiO_2	1,00 a 1,30
CaO	0,01 a 0,30
MgO	0,40 a 0,50
Na_2O	0,02 a 0,03
K_2O	0,60 a 0,70
Umidade	0,90 a 1,00
P F à 1000ºC	12,50 a 13,00

Outras Características:

Refratariedade simples – 1600 a 1680ºC
Massa específica real (seca) – 2,50 a 2,65 g/cm^3

Massa específica aparente moída – 0,5 a 0,65 g/cm^3 (malha 325)
Porosidade aparente – 16,00 a 18,50 %
Absorção de água 9 a 10 %
Partículas abaixo de 5 microns – 65 a 70 %
Cor já seca moída – cinza-clara a bege
pH – 5 a 6
Granulometria – seca ao Sol, destorroada, moída em moinho Raymond – sedimentação para eliminar a sílica-livre (areia) e classificada em malha 200 e principalmente em malha 325 com retenção máxima de 3,5%.

Ensaios no laboratório de solos da Unesp/Ilha Solteira determinaram uma massa específica seca de 2,62 g/cm^3.

IV.1.2 - Areia

A areia utilizada para confecção das amostras é comum e destinada a construção de filtros de poços de bombeamento. Para os ensaios foram utilizadas partículas com diâmetro médio constante, para isso utilizou-se apenas areia retida nas peneiras 200, 140, 100 e 60 (numeração segundo a NBR-5734/80) que possuem os diâmetros equivalentes de 0,075; 0,105; 0,15 e 0,25mm, respectivamente. A massa específica seca da areia utilizada é de 2,65 g/cm^3.

IV.1.3 - Carbopol

Nos ensaios de reometria que permitiram a visualização dos processos de sedimentação e ressuspensão, utilizou-se o polímero acrílico Carbopol 940.

O Carbopol 940 é um polímero acrílico utilizado pela indústria farmacêutica como emulsificante (espessante) e que, quando adicionado à água, forma uma solução coloidal com propriedades viscoplásticas. Esse material, misturado com água, forma uma mistura transparente ou algumas vezes acinzentada que permite a visualização dos fenômenos mecânicos ocorridos no seu interior auxiliando, dessa forma, e em muito, o entendimento dos processos reológicos associados ao fenômeno.

Para a utilização do Carbopol devem ser tomados alguns cuidados tais como: deve-se estabilizar o pH da água (utilizada como solvente) em torno de 8,00 para garantir a total diluição do polímero pelo solvente, evitando a ocorrência da sua precipitação. Devido à dificuldade na determinação da massa específica do Carbopol, devem-se caracterizar as misturas em concentração em massa e não em volume como é feito corriqueiramente para as misturas de água+argila.

IV.1.4 - Equipamentos

IV.1.4.1 - Reômetro

O reômetro utilizado nos ensaios de reometria é o R/S Rheometer, que fornece os parâmetros para vários modelos reológicos assim como as curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de 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. Utiliza-se também, associado ao reômetro, o banho térmico, que serve para manter constante a temperatura da amostra durante o ensaio e o software Rheo 2000, que auxilia na obtenção e interpretação dos resultados.

O reômetro, juntamente com o banho térmico, é mostrado na Figura 16.

Figura 16: Aparato experimental instalado no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria – Unesp/Ilha Solteira

IV.1.4.2 - "*Spindles*"

Os "*spindles*" são acessórios com os quais realizam-se os testes de cisalhamento (Figura 17). Sua escolha 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 17: "*Spindles*" utilizados

Tabela 2: 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 de Cisalhamento x Taxa de Deformação devem ser semelhantes.

IV.1.4.3 - Banho térmico

O controle de temperatura é feito com o auxilio do banho térmico (Figura 18), isso é possível devido ao sistema de circulação ligado ao reômetro.

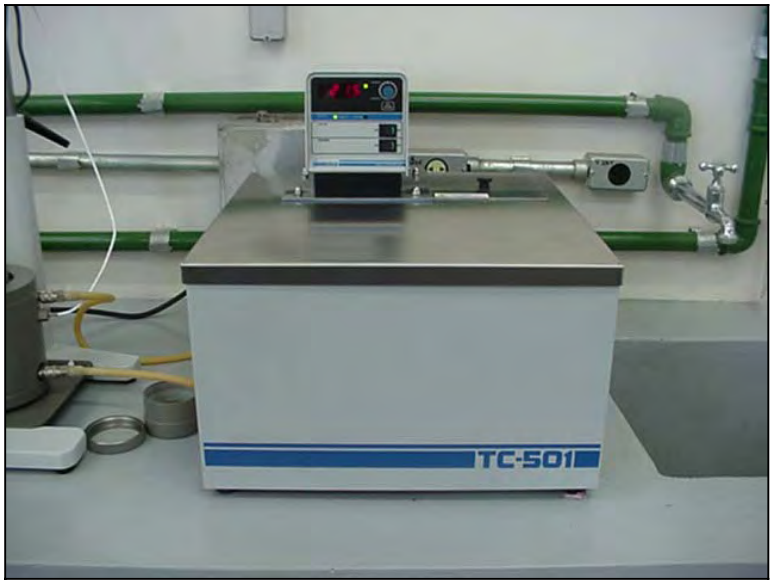


Figura 18: Banho térmico

Dependendo da faixa de temperatura na qual deseja-se 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 estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Faixas de temperaturas de operação de fluidos de controle de temperatura

Fluido	Faixa normal de utilização (ºC)	Faixa extrema de utilização (ºC)
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. Pôde-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, adeqüa 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, a ordem de 5%.

IV.1.4.4 - pH-metro

Como todos os compostos da misturas possuem suas características químicas constantes, com exceção da água, esse elemento é o único capaz de causar mudanças no pH da mistura. Apesar disso e de se dispor de dois tipos de fluido inicial (água) que podem ser utilizados no preparo das misturas intersticiais (água+argila), ou seja, água destilada ou água servida pelo sistema público, a utilização de qualquer um desses dois tipos de água não gerou variações de pH significativas nas misturas.

Contudo, optou-se pela utilização da água servida pelo sistema púbico. O pH-metro utilizado foi o medidor de pH de Bancada modelo mPA-210/mPA210P da Ação Científica Produtos para Laboratório LTDA.

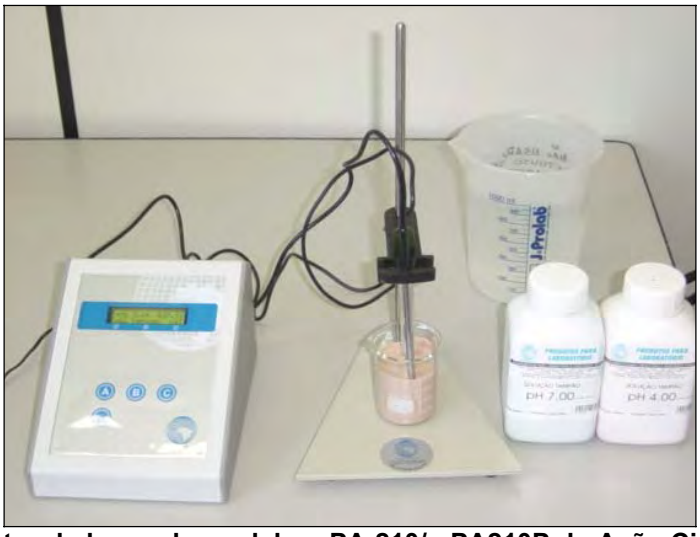


Figura 19: pH-metro de bancada modelo mPA-210/mPA210P da Ação Científica Produtos para Laboratório LTDA

IV.1.4.5 - Canal e conjunto moto-bomba

Nos ensaios preliminares de superfície livre foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Canal protótipo: Canal de acrílico com 2,00m de comprimento; 0,30m de largura e 0,15m de altura – Figura 20. Esse canal pode ser inclinado de 0º a 10º.

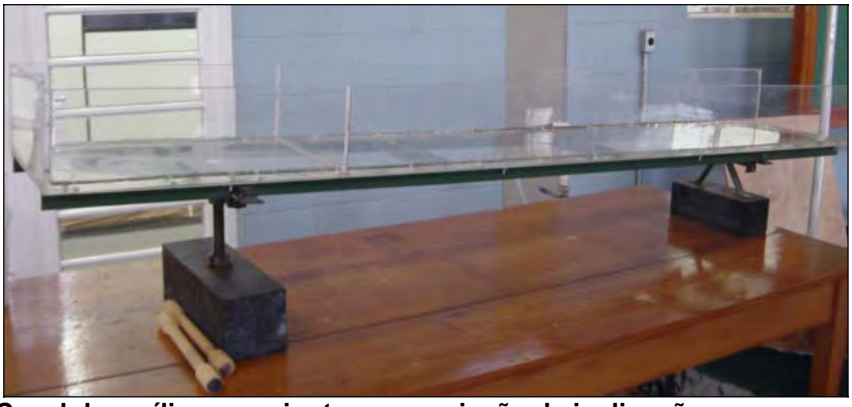


Figura 20: Canal de acrílico e conjunto para variação de inclinação

- Conjunto bomba+reservatório: Para garantir um fluxo constante do material água+argila+areia fina será utilizada uma bomba centrífuga de 0,50 CV, acoplada a um reservatório de 1000 l. O conjunto bomba+reservatório e o conjunto canal+bomba+reservatório podem ser vistos na Figura 21a e 21b, respectivamente.

(a) **(b)**

Figura 21: (a) - Conjunto bomba+reservatório; (b) - Conjunto canal+bomba+reservatório de armazenamento

Para os ensaios definitivos de escoamento em superfície livre foi utilizado um conjunto moto-bomba associado a uma plataforma inclinada residente no Laboratório de Hidrologia/Hidrometria da UNESP/Ilha Solteira.

O aparato experimental consiste em um canal de 10 metros de comprimento e até 0,60 metro de largura. Possui dispositivo que permite a variação da seção transversal interna, que pode ser retangular ou trapezoidal. Com o auxílio de um macaco hidráulico, pode-se também, variar a declividade até 30 %.

Tem-se um sistema de recirculação fechado onde o fluxo hiperconcentrado é garantido por intermédio de uma bomba (Moto-Bomba Helicoidal 7,5 HP), que recalca lama para um reservatório de nível constante, e que é laminada por orifícios na etapa subseqüente adentrando pelo canal. O controle de vazão é feito por um inversor de freqüência que controla a rotação da bomba. O canal residente, o inversor de freqüência e o conjunto moto-bomba podem ser vistos nas Figuras 22a, 22b e 22c, respectivamente.

Figura 22a: Canal residente no Laboratório de Hidrologia e Hidrometria da UNESP/Ilha Solteira

Figura 22b: Inversor de freqüência

Figura 22c: Conjunto moto-bomba utilizado para recirculação do fluido hipercondentrado

IV.1.4.6 - Equipamentos auxiliares

Serão utilizados os seguintes equipamentos:

Cronômetro: Para a medição de vazão pelo método volumétrico;

Estufa: Para secagem de materiais e determinação da concentração das amostras do canal;

Jogo de peneiras e peneirador mecânico: Na determinação da granulometria dos materiais inertes foram utilizados um jogo de peneiras ABNT e um peneirador mecânico.

Todos estes equipamentos podem ser vistos nas Figuras 23a, 23b, 23c.

(a) **(b)** **(c)**

Figura 23: (a) – Cronômetro para medição de vazão; (b) – Estufa para secagem de materiais; (c) – Jogo de peneiras ABNT e peneirador mecânico

IV.2 - Metodologia utilizada

O preparo das amostras apresentadas neste trabalho foi realizado da seguinte forma: as frações de sólidos adicionados foram feitas em concentrações em volume, assim, as frações adicionadas de sólidos foram calculadas pela Equação 64:

$$C_v = \frac{Volume\ de\ sólidos}{Volume\ total\ da\ mistura}, \text{ sendo} \qquad (64)$$

C_v: Concentração em volume de sólidos na mistura.

No volume total da mistura é computado o volume dos sólidos e do fluido utilizado na mistura, no volume de sólidos é computado apenas o volume dos grãos.

Em alguns casos (quando ocorre a adição de partículas coloidais e não coloidais) o volume de fluido pode ser indicado pelo volume de fluido intersticial (água+colóides), pois este forma uma mistura homogênea.

Em todas as amostras ensaiadas foram medidos os valores de pH e temperatura para garantir as mesmas condições de ensaios.

IV.2.1 - Determinação das incertezas experimentais

Na busca da estimativa das incertezas envolvidas nos ensaios experimentais, foram realizados alguns testes referentes aos ensaios reométricos.

Com relação aos ensaios reométricos, foram tomados os seguintes procedimentos: todas as amostras tiveram o mesmo tempo de repouso para saturação dos grãos de argila. Além disso, em todos os ensaios reométricos, adotou-se controlar a tensão de cisalhamento e ler a respectiva taxa de deformação. Optou-se por esse procedimento devido à possível ocorrência de tensão crítica das misturas ensaiadas (se fosse controlada a taxa de deformação não seria possível observar o aumento de tensão sem a ocorrência de deformação na amostra).

O Reômetro R/S Brookfield, utilizado nesta pesquisa, possui um sistema de indução por contato mecânico entre o rotor e o eixo do "*spindle*", dessa forma, esse equipamento não garante precisão para dados coletados abaixo de 10 s^{-1} de taxa de deformação (a Figura 24 mostra a zona caótica de pontos abaixo de 10 s^{-1} para ensaios reométricos). Devido a isso todos os dados foram obtidos em ensaios reométricos filtrados garantindo que os valores utilizados no ajuste realizados pelo software Rheo2000 estariam dentro da faixa de confiança do equipamento.

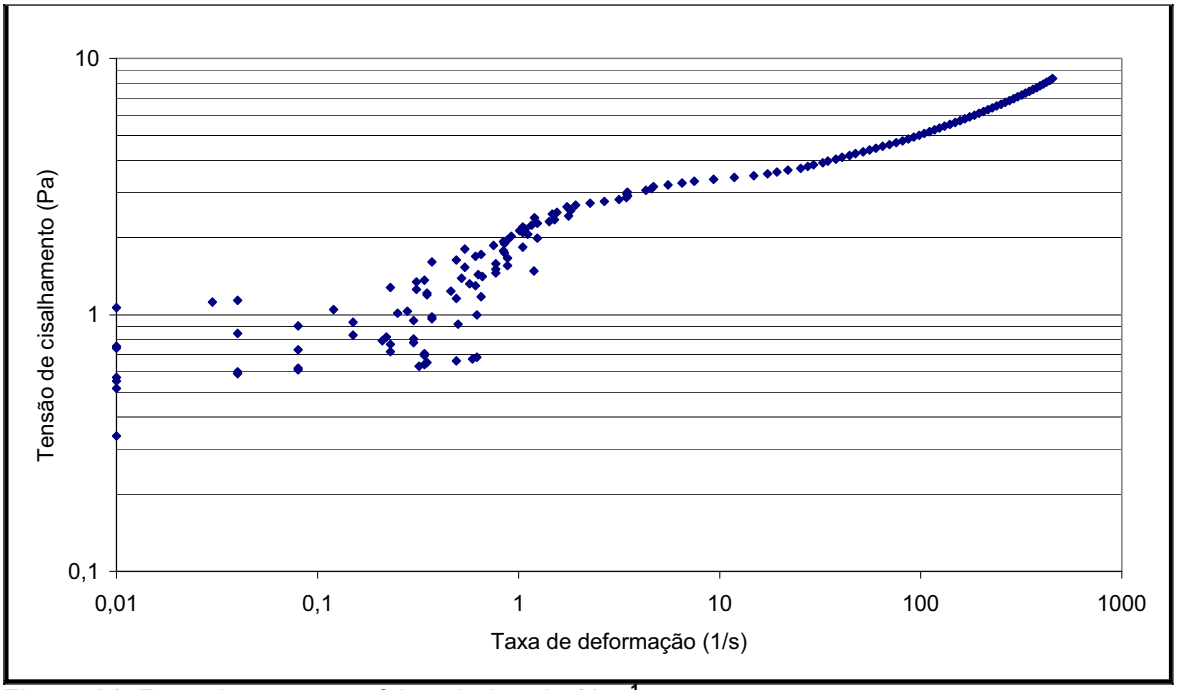


Figura 24: Zona de pontos caótica abaixo de 10 s^{-1}

Além disso, a precisão do equipamento, segundo o fabricante, é de ± 3%, dessa forma, os dados dentro do intervalo de confiança do equipamento podem variar de ± 3% com relação ao valor medido. Como foi definido que, para os ensaios reométricos, controlava-se a tensão de cisalhamento, o erro de valor medido é referente à taxa de deformação. Na busca de se minimizar erros aleatórios e sistemáticos, para os dados reométricos que serão apresentados, foram realizados vários ensaios, inclusive enviando amostras para outros centros de pesquisa (Empresa de reometria BRASEQ e Centro de Pesquisa Petrobras - CENPES/RJ), para garantir a repetibilidade dos resultados encontrados.

Foram realizadas três séries de ensaios com mistura de água+argila caulinítica com concentração em volume de 10, 15 e 20% de sólidos no volume total da mistura. O procedimento tomado foi o seguinte:

Foram preparadas amostras nas concentrações descritas e deixadas em repouso por 7 dias (assim como as amostras utilizadas nos ensaios reométricos);

Após o período de repouso, foram ensaiadas 10 amostras de cada uma das misturas (10 amostras com concentração em volume de 10%, 10 amostras com concentração em volume de 15% e 10 amostras com concentração em volume de 20%); e

Foram determinados os desvios-padrão dos parâmetros reométricos dos ajustes dos dados ao modelo de Herschel-Bulkley.

Para a determinação do desvio-padrão foi utilizado a Equação (65):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma\left(\overline{X} - x\right)^2}{n-1}}\text{, sendo} \qquad (65)$$

σ : Desvio-padrão;

$\overline{X}$: Valor médio da medida;

x : Valor de cada medição; e

n : Número de elementos da amostra.

Os jogos de curvas reométricas podem ser vistas nas Figuras 25, 26 e 27.

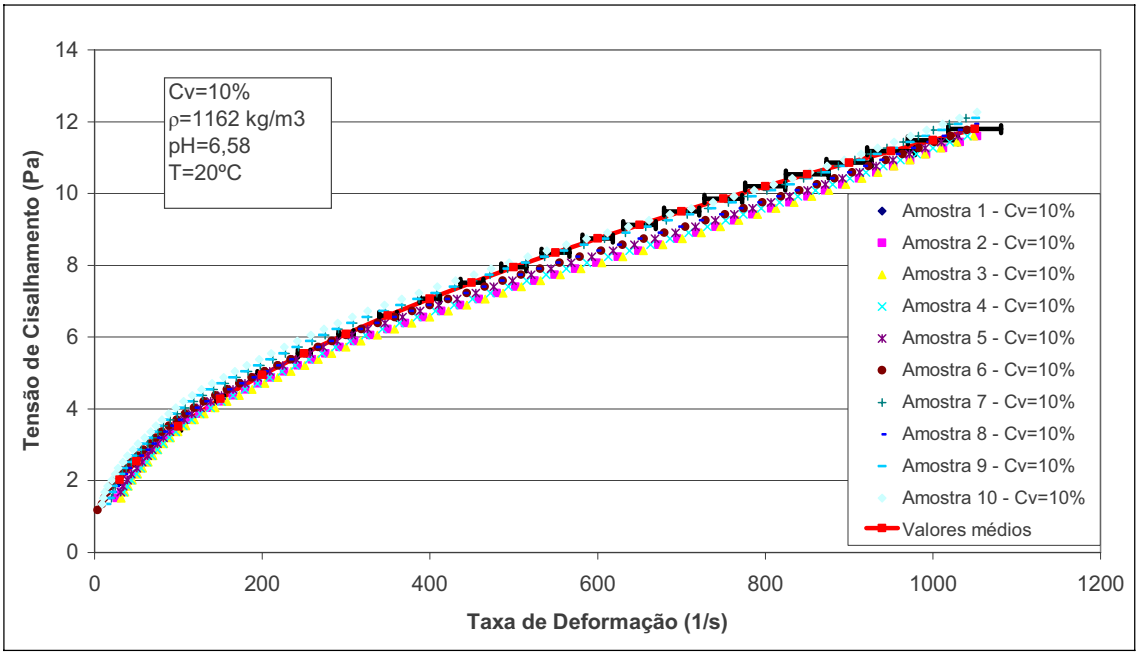


Figura 25: Determinação dos erros para 10 amostras com C_v=10%, apresentação da curva reológica do valor médio e da barra de erros com variação de ± 3%

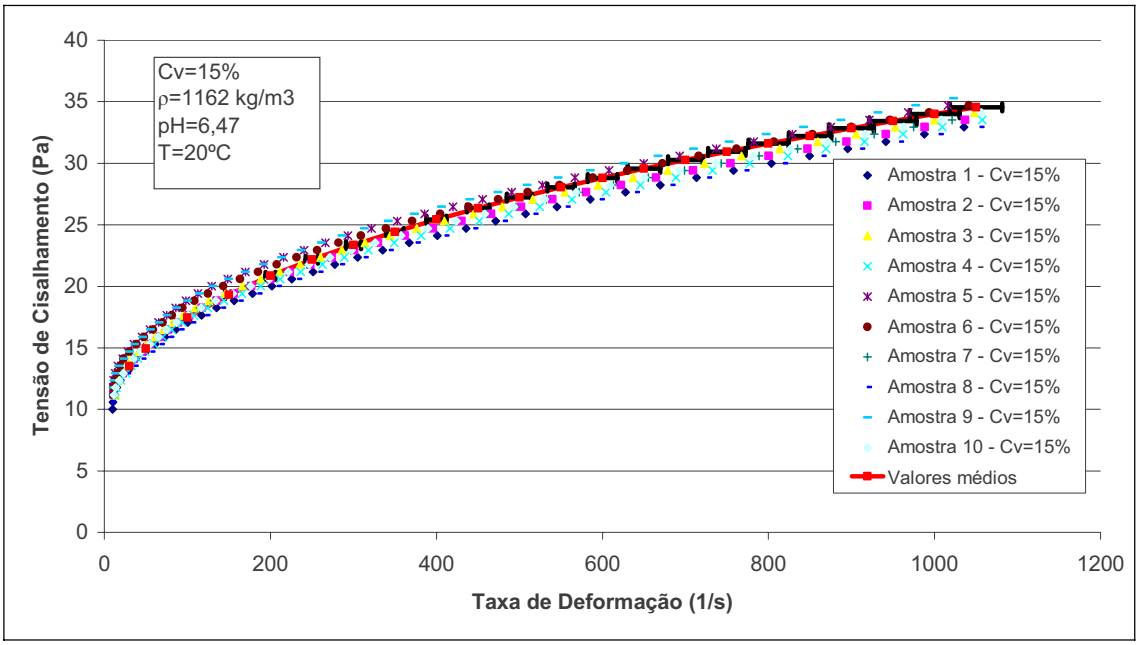


Figura 26: Determinação dos erros para 10 amostras com C_v=15%, apresentação da curva reológica do valor médio e da barra de erros com variação de ± 3%

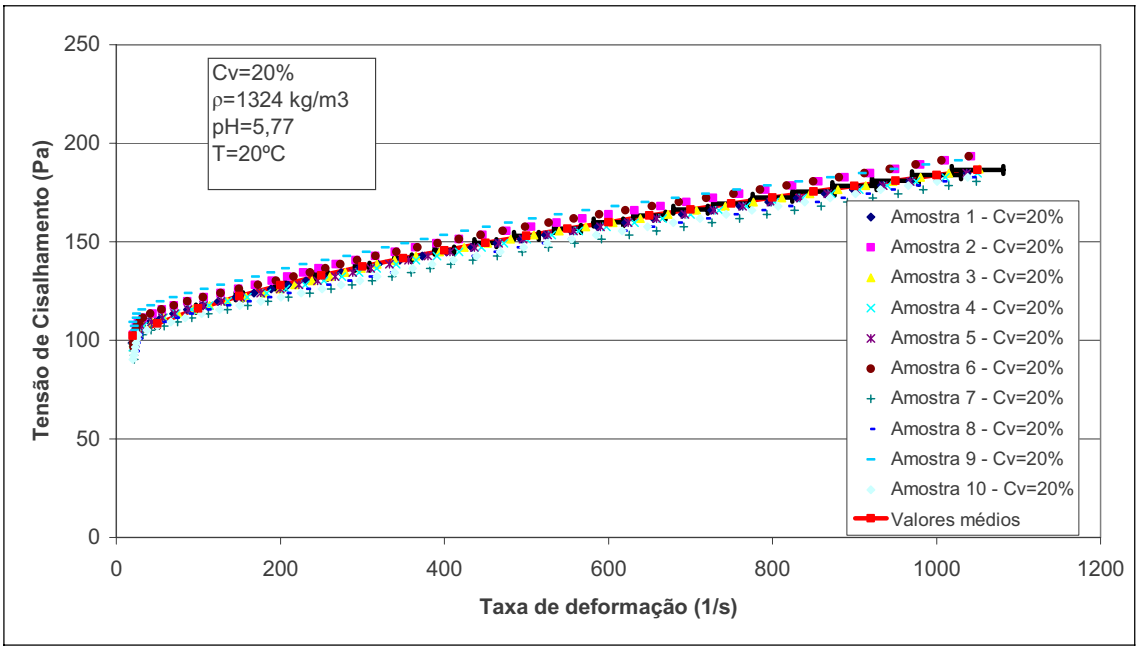


Figura 27: Determinação dos erros para 10 amostras com C_v=20%, apresentação da curva reológica do valor médio e da barra de erros com variação de ± 3%

A Tabela 4 mostra os valores utilizados na determinação dos valores médios e dos desvios-padrão de cada uma das amostras.

Tabela 4: Valores utilizados na determinação dos desvios-padrão

	Misturas								
	C_v=10%			C_v=15%			C_v=20%		
Amostra	**τ_c (Pa)**	**k (Pas^n)**	**n**	**τ_c (Pa)**	**k (Pas^n)**	**n**	**τ_c (Pa)**	**k (Pas^n)**	**n**
1	0,50	0,14	0,62	7,89	1,22	0,43	94,56	1,35	0,60
2	0,47	0,20	0,57	7,71	1,43	0,45	95,76	1,57	0,59
3	0,47	0,18	0,58	7,60	1,53	0,41	93,02	1,39	0,60
4	0,45	0,21	0,57	7,75	1,31	0,43	94,24	1,17	0,62
5	0,44	0,23	0,55	7,17	1,71	0,43	93,31	1,37	0,60
6	0,50	0,20	0,57	7,79	1,70	0,42	93,91	1,77	0,58
7	0,47	0,28	0,53	7,51	1,51	0,41	92,53	1,13	0,63
8	0,51	0,23	0,56	7,90	1,11	0,44	93,09	1,70	0,61
9	0,44	0,31	0,53	7,60	1,83	0,4	95,11	1,80	0,57
10	0,52	0,30	0,54	7,89	1,34	0,43	90,04	1,09	0,63

Os valores determinados estão apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7.

- Concentração em volume de 10%

Tabela 5: Apresentação dos valores médios e desvios-padrões para as amostras com concentração em volume de 10%

	Valores Médios	**Desvios-Padrão**	**Erros dos desvios padrões (%)**
τ_c (Pa)	0,48	0,030	6,29
k (Pas^n)	0,23	0,054	23,83
n	0,56	0,027	4,80

- Concentração em volume de 15%

Tabela 6: Apresentação dos valores médios e desvios-padrões para as amostras com concentração em volume de 10%

	Valores Médios	Desvios-Padrão	Erros dos desvios padrões (%)
τ_c (Pa)	7,68	0,225	2,93
k (Pas^n)	1,47	0,231	15,75
n	0,43	0,016	3,76

- Concentração em volume de 20%

Tabela 7: Apresentação dos valores médios e desvios-padrões para as amostras com concentração em volume de 10%

	Valores Médios	Desvios-Padrão	Erros dos desvios padrões (%)
τ_c (Pa)	93,56	1,594	1,70
k (Pas^n)	1,43	0,265	18,45
n	0,60	0,020	3,36

Pode-se notar que com o aumento da concentração em volume os valores dos erros diminuem.

Em todos os ensaios o parâmetro que apresentou maior erro foi o coeficiente de ajuste *k* (índice de consistência). Isso se deveu ao fato desse parâmetro ser um coeficiente de ajuste e, assim, para cada uma das curvas, esse valor depende da tensão crítica e do índice de escoamento que já apresentavam erros.

Considerando que esta Dissertação tem como objetivo uma análise qualitativa do comportamento reológico das misturas em função da adição de areia, a utilização da barra de erro nos gráficos apresentados será restrita a ensaios nos quais a exposição do erro é relevante.

O maior desvio-padrão encontrado, para a tensão crítica, foi para a mistura de 10% de concentração em volume de sólidos (6,29%). Dessa forma, utilizou-se este valor de erro para compor, junto com o erro do aparelho, o erro total apresentado nas Figuras 36, 37, 84, 85, 86 e 87 que apresenta valores de tensões críticas.

Segundo Moffat (1988), a composição do erro total (erro experimental + erro do aparelho) é dada pela Equação 66:

$E_T = \sqrt{E_E^2 + E_A^2}$, sendo (66)

E_T: Erro total;

E_E: Erro experimental; e

E_A: Erro do aparelho.

As demais metodologias, utilizadas em cada tipo de ensaio, são pormenorizadas no item **"RESULTADOS E DISCUSSÕES"**.

CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Optou-se por dividir este Capítulo em 4 partes, de maneira a facilitar as discussões em função de cada tipo de ensaio reológico, quais sejam:

- Parte 1: Análise do comportamento reológico da matriz fluida hiperconcentrada constituída de água+argila caulinítica;
- Parte 2: Análise dos efeitos de sedimentação e ressuspensão no interior do fluido intersticial não-newtoniano;
- Parte 3: Análise da influência dos sólidos inertes no comportamento reológico das misturas; e
- Parte 4: Determinação de lei de atrito para misturas compostas de água+argila+areia fina escoando em canal aberto.

Deve-se lembrar que todas as discussões referentes aos ensaios apresentados serão arroladas durante a apresentação dos resultados.

V.1 - Parte 1

Como já foi dito no Capítulo **ESTADO DA ARTE**, o comportamento das misturas matriz fluida+material inerte tem as mesmas propriedades do fluido intersticial (por exemplo, ter comportamento newtoniano ou não). Dessa forma, como o fluido intersticial utilizado nas misturas ensaiadas é um fluido não-newtoniano composto de água+argila, as propriedades desse fluido pode influenciar, e em muito, no comportamento final da mistura, o que justifica o estudo mais detalhado de algumas de suas propriedades, ainda em processo de investigação pela equipe de trabalho. Ressalta-se que é este fluido intersticial que lubrifica o movimento relativo das partículas inertes.

V.1.1 - Ensaios de tixotropia

A análise da variação das curvas de escoamento e de propriedades derivadas (como a viscosidade), em função do tempo (tixotropia), é um aspecto importante quando da caracterização reológica rigorosa de um mistura hiperconcentrada. Estes ensaios têm a finalidade de analisar a capacidade da

amostra de recuperar sua resistência inicial em função do repouso e da taxa de deformação aplicada.

V.1.1.1 - Ensaios de pista de carregamento constantes com pistas de repouso

Inicialmente para a análise do comportamento tixotrópico do material água+argila, com concentração em volume de 15%, foram realizados ciclos de carregamento com pistas constantes, seguidas de períodos de repouso e novo carregamento uniforme. Além disso, para avaliar a influência da intensidade e a ordem dos carregamentos foram realizados ensaios com diferentes pistas e intensidades de carregamentos. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 28, 29 e 30.

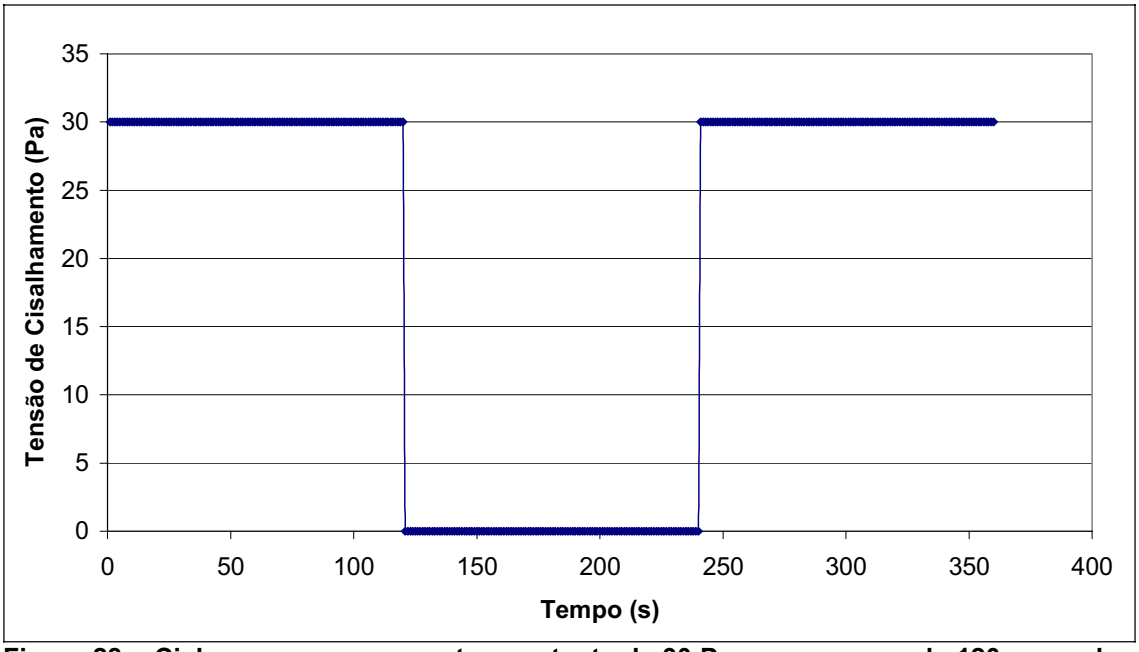


Figura 28a: Ciclos com carregamento constante de 30 Pa com repouso de 120 segundos (C_v de 15%)

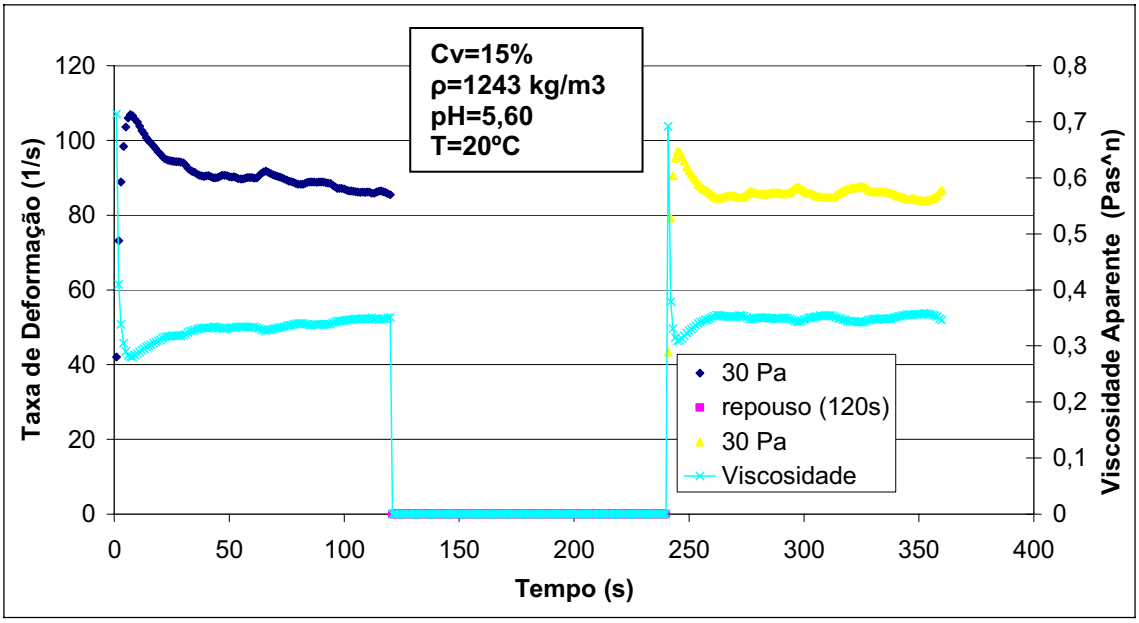


Figura 28b: Comportamento da deformação e viscosidade no tempo para ensaio de carregamento constante

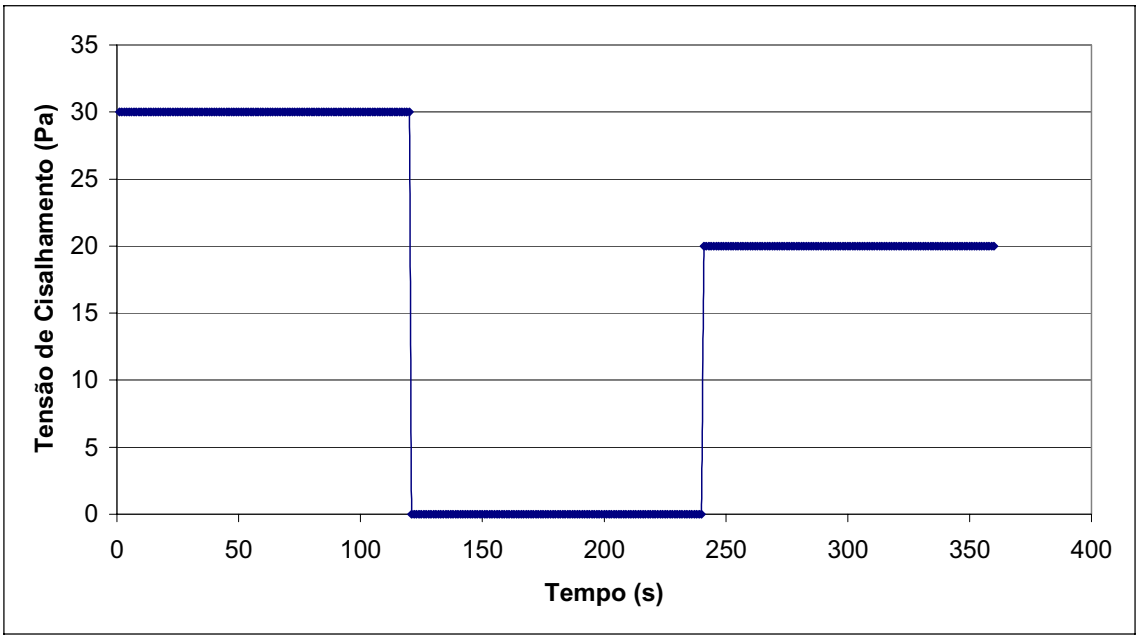


Figura 29a: Ciclos com carregamento constante de 30 e 20 Pa com repouso de 120 segundos (C_v de 15%)

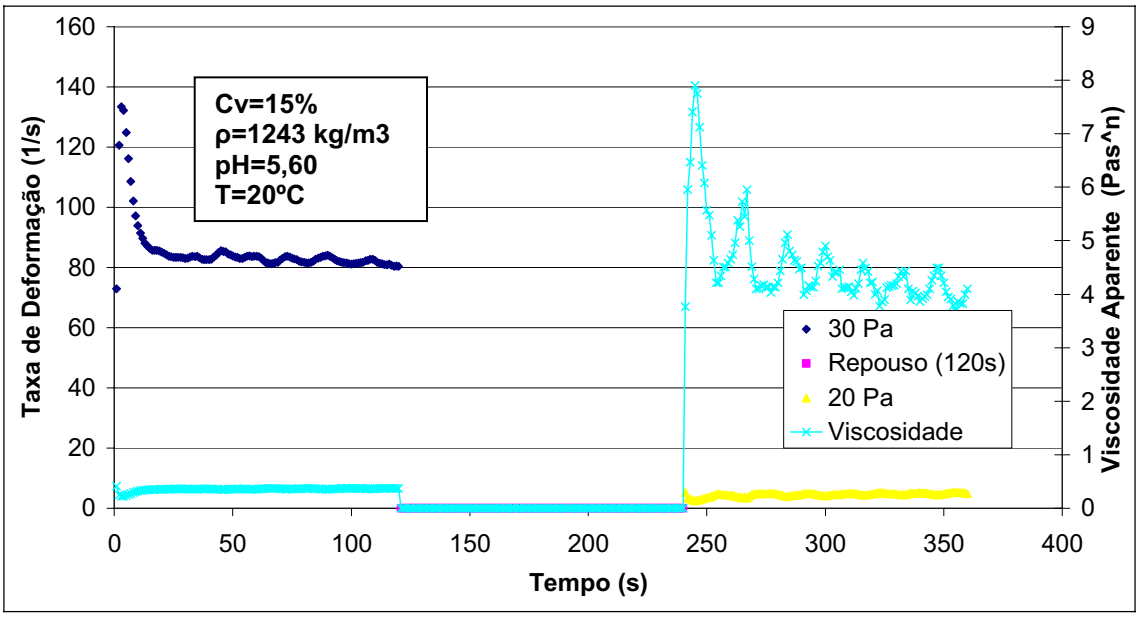


Figura 29b: Comportamento da deformação e viscosidade no tempo para ensaio de carregamento constante

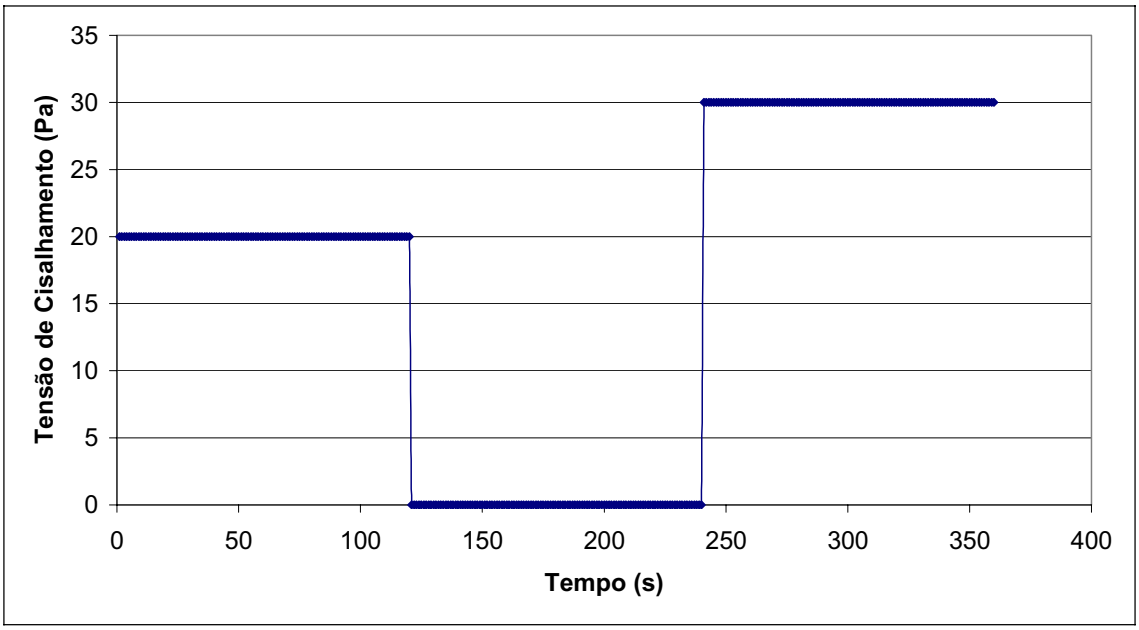


Figura 30a: Ciclos com carregamento constante de 20 e 30 Pa com repouso de 120 segundos (C_v de 15%)

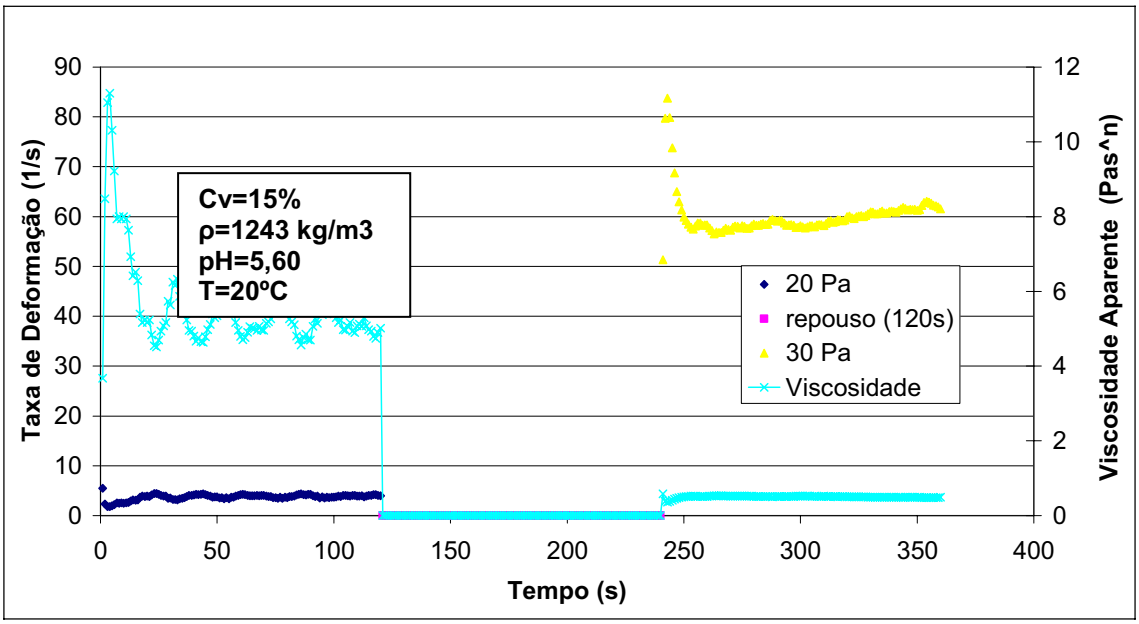


Figura 30b: Comportamento da deformação e viscosidade no tempo para ensaio de carregamento constante

Para a amostra ensaiada de 15% de concentração em volume nota-se que nos ciclos de carregamento, com pistas de mesma intensidade, o material perde viscosidade durante o primeiro carregamento e retoma essa viscosidade no período de repouso. Quando se aplica a segunda pista de carregamento o material volta a perder viscosidade e se estabiliza no mesmo patamar que havia se estabilizado durante o primeiro carregamento (Figuras 28).

Nos ensaios mostrados nas Figuras 29 e 30 observa-se que para taxas de tensão de 20 Pascais os valores obtidos de deformação são abaixo de 10 (s^{-1}) gerando altos valores de viscosidade. Apesar dessa faixa de dados ser considerada imprecisa pelo equipamento, pode-se observar que para os dois casos (carregamento inicial de 20 Pa e depois de 30 Pa e de carregamento inicial de 30 Pa e depois de 20 Pa) os patamares de viscosidade são da mesma ordem de grandeza e, dessa forma, mostra-se que as propriedades do material são iguais para os dois casos de carregamento.

Esse fato indica recuperação de propriedades da amostra para taxas de tensões iguais (a viscosidade apresentada quando o carregamento inicial é de 20 Pa é igual à viscosidade apresentada quando o carregamento posterior é de 20 Pa).

V.1.1.2 - Ensaios de pistas de carregamento e descarregamento graduais

Nesta segunda etapa foram realizados 2 tipos de testes: no primeiro tipo, o reômetro foi programado para realizar ensaios com uma pista de carregamento gradual e, logo em seguida, uma pista de descarregamento gradual. Foram realizados dois testes comparativos (um com as pistas de carregamento e descarregamentos com o mesmo tempo e, outro, com pista de carregamento e descarregamento com tempos diferentes).

No segundo tipo de ensaio as deformações foram impostas de forma crescente (carregamento) e decrescente (descarregamento) em vários ciclos de 120 s cada um. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 31, 32 e 33.

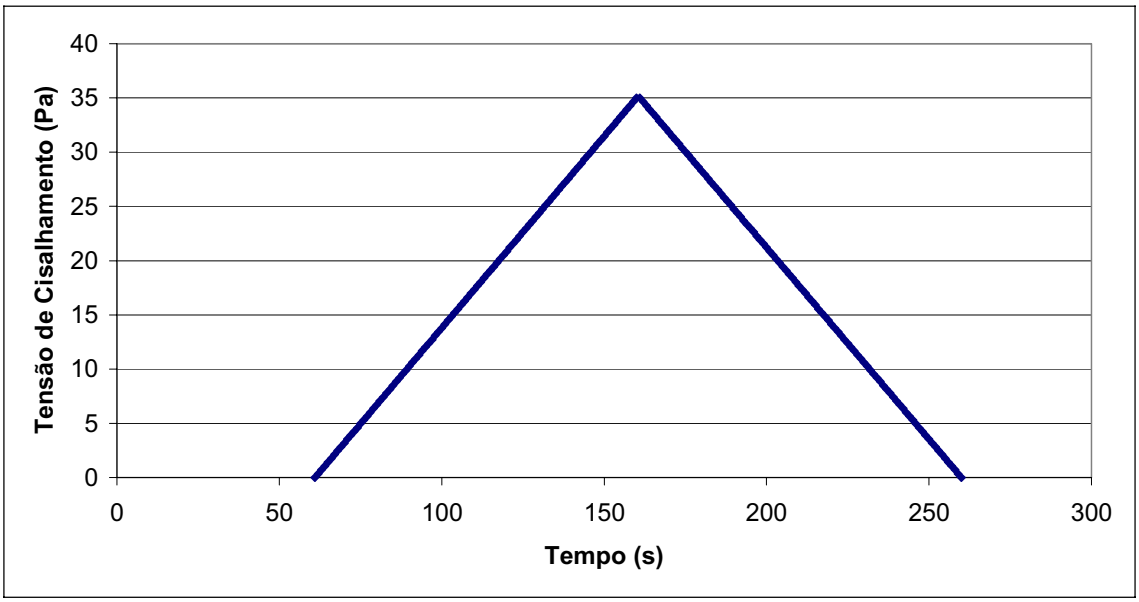


Figura 31a: Ciclos de carregamento (100 segundos) e descarregamento (100 segundos) gradual com (C_v de 15%)

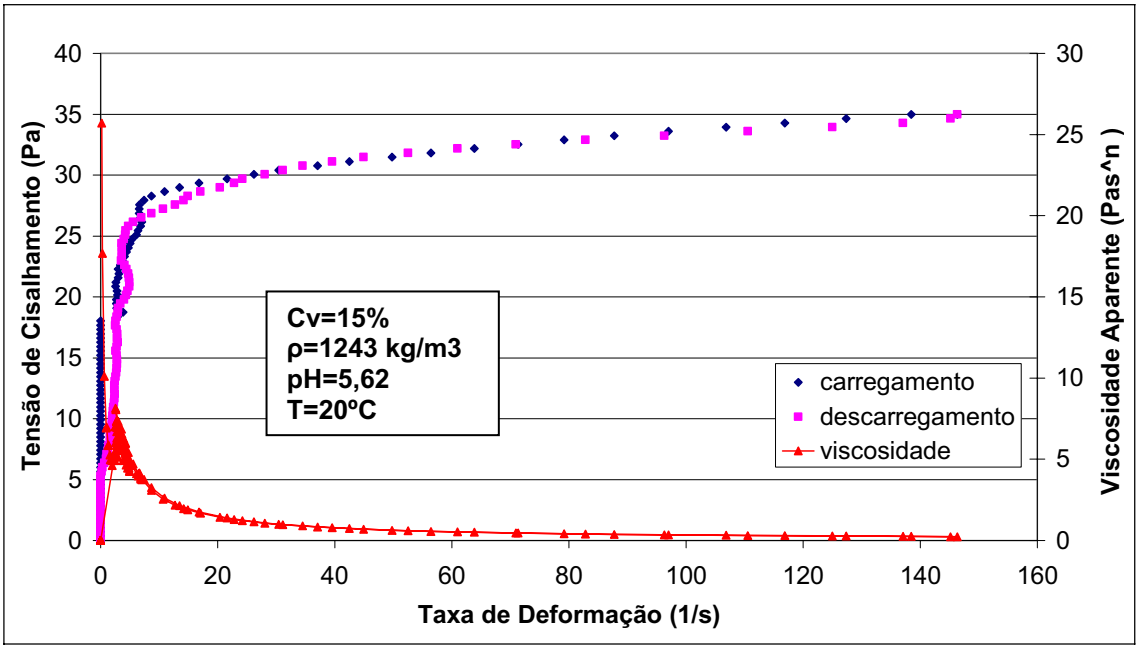


Figura 31b: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação e viscosidade x deformação para ensaio de carregamento e descarregamento gradual

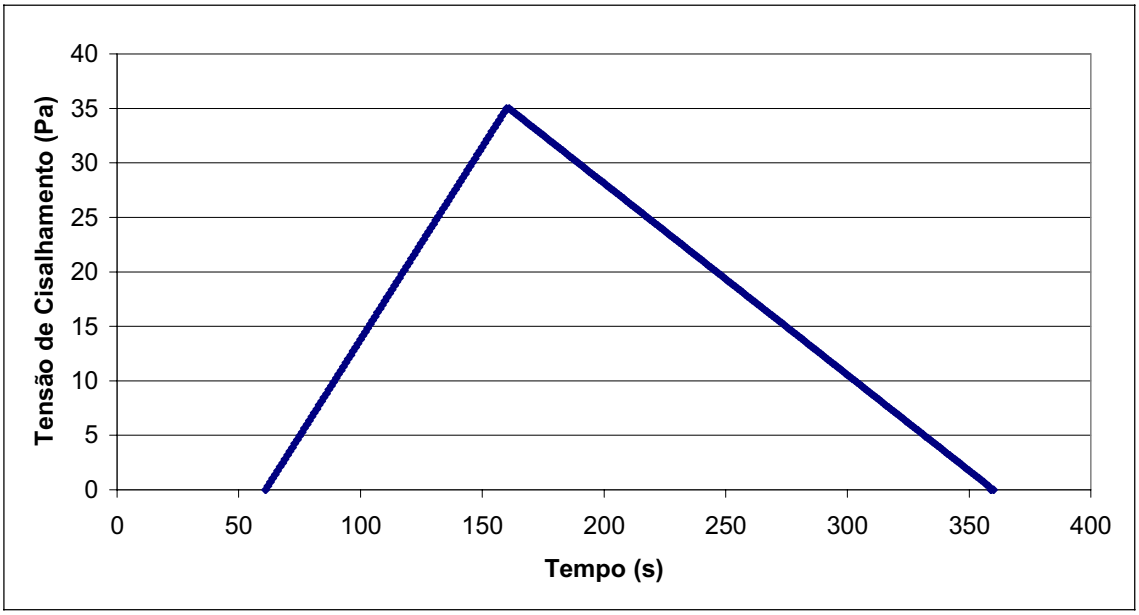


Figura 32a: Ciclos de carregamento (100 segundos) e descarregamento (200 segundos) gradual com (C_v de 15%)

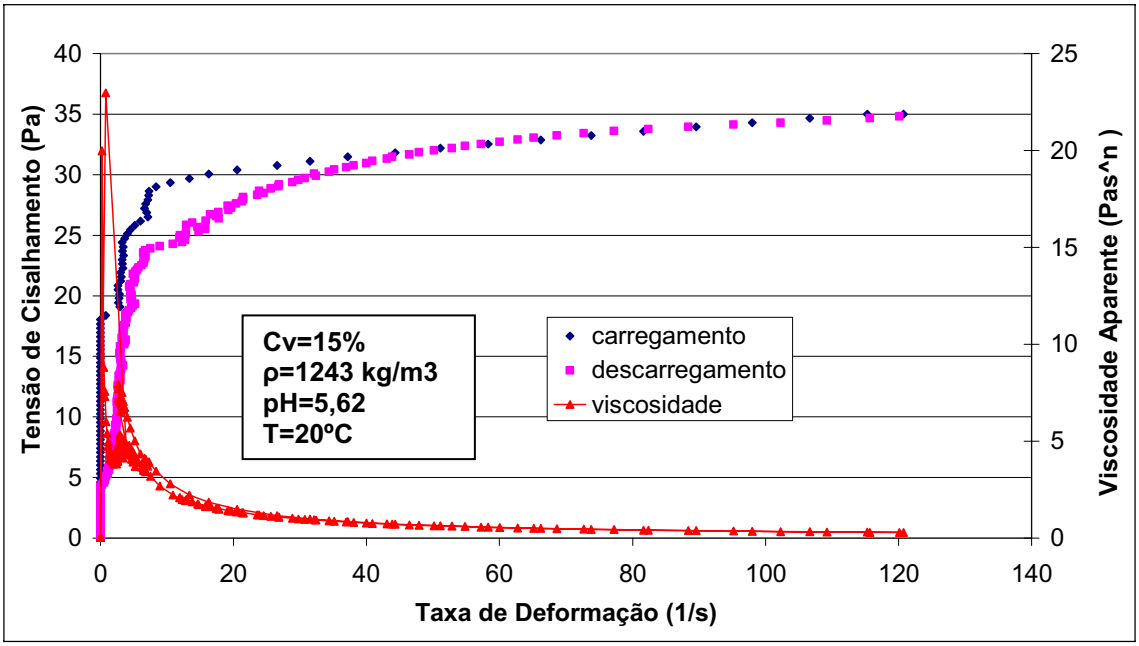


Figura 32b: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação e viscosidade x deformação para ensaio de carregamento e descarregamento gradual

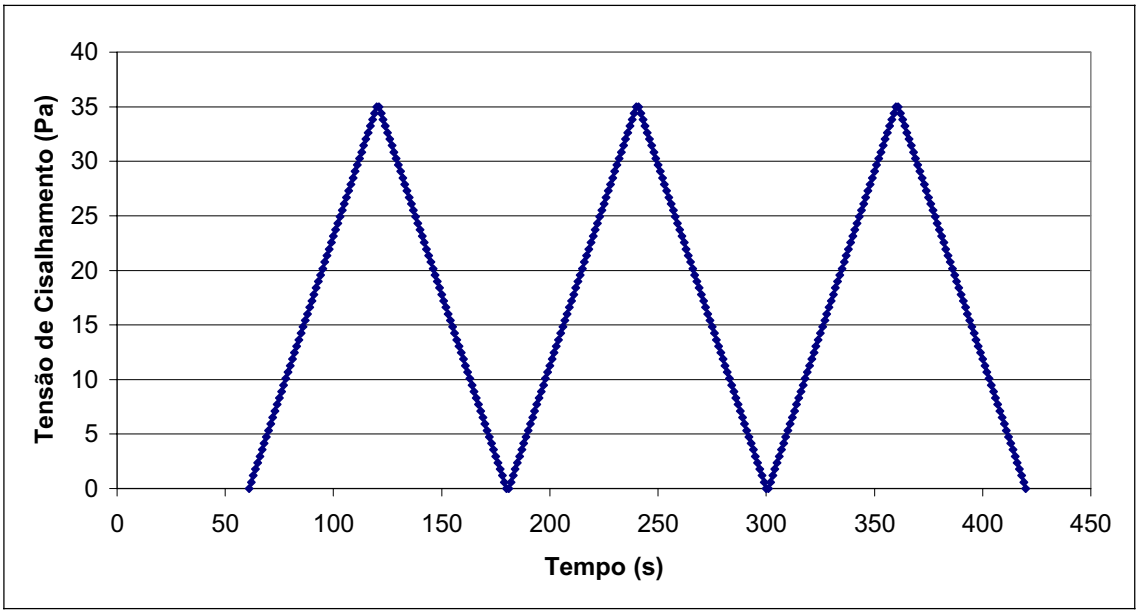


Figura 33a: Ciclos de carregamento (60 segundos) e descarregamento (60 segundos) consecutivos com C_v de 15%

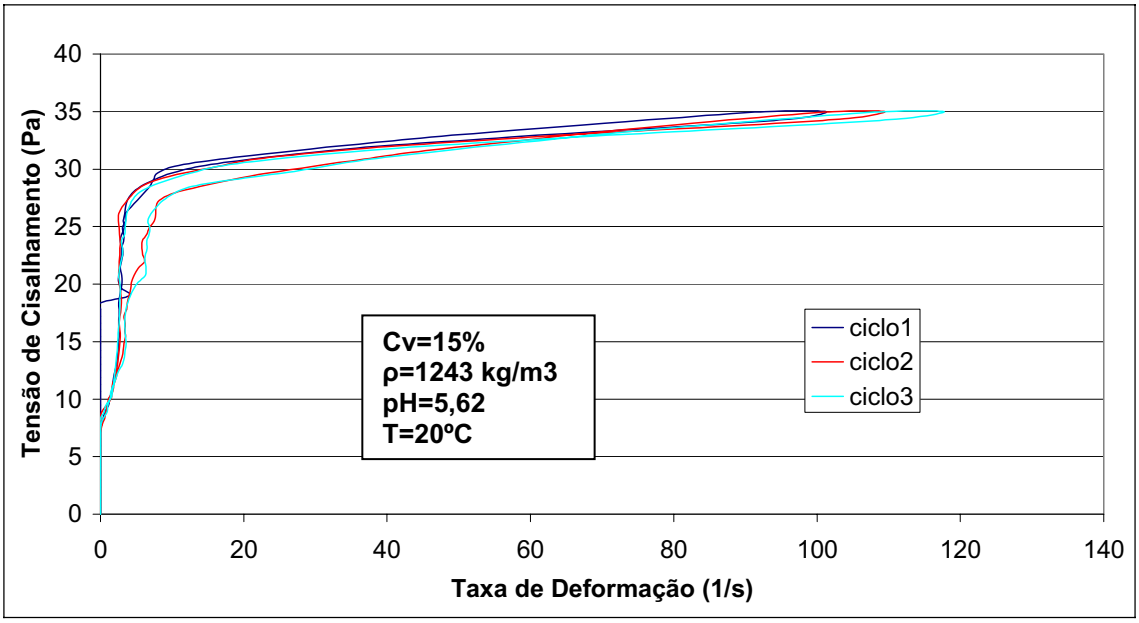


Figura 33b: Variação das curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação para cada ciclo de carregamento

As amostras ensaiadas possuíam concentração em volume de 15%, o ensaio apresentado pela Figura 31 foi realizado com tempos iguais de carregamento e descarregamento (100 segundos). Para essa configuração ocorreu uma aproximação das curvas de carregamento e descarregamento.

Já o ensaio mostrado na Figura 32 foi realizado com tempos de carregamento diferentes dos tempos de descarregamento, respectivamente 100 segundos para carregamento e 200 segundos para descarregamento.

Para essa amostra ocorreu um afastamento da curva de carregamento e descarregamento. Isso pode ter ocorrido porque durante o descarregamento mais longo a amostra ficava mais tempo cisalhada o que dificultava a reestruturação e conseqüentemente a recuperação da resistência inicial.

A Figuras 33 mostram a aplicação de 3 ciclos de carregamento e descarregamento com tempos iguais de 60 segundos (120 segundos cada ciclo). Para esse caso pode-se observar uma maior deformação dos ciclos em relação ao ponto máximo alcançado pelo primeiro, isso indica uma maior deformação para os ciclos subseqüentes em relação aos primeiros que pode ocorrer devido a amostra, após ser descarregada no primeiro ciclo não conseguir recuperar totalmente a resistência inicial (por não ter o mínimo tempo de repouso) antes de ser novamente carregada e assim, atingir uma deformação maior que no ciclo anterior.

Com estes resultados pode-se concluir que o material apresenta-se com tixotropia, porém uma tixotropia moderada (nos tempos de ensaio utilizados nessa pesquisa), pois propriedades do material são recuperadas em tempos curtos, além de apresentar as mesmas características para tempos de ensaios iguais.

V.1.2 - Análise da influência do modo de preparo da mistura

Um outro fator importante no comportamento reológico da mistura intersticial é o modo de preparo da mistura, dessa forma foram realizados ensaios para analisar esta influência.

O modo de preparo, seja espatulando a amostra, seja mixando-a no próprio reômetro, seja por agitação manual, é um parâmetro que tem sua influência modificada com o passar tempo, a partir do preparo. Os resultados apresentados nas Figuras 34 e 35 são de duas amostras preparadas de formas diferentes, porém de mesma concentração em volume - C_v. A primeira mistura foi agitada manualmente por 5 minutos dentro de um recipiente fechado, enquanto que a segunda foi suavemente espatulada por 5 minutos. Ambas foram ensaiadas à mesma temperatura e verificou-se que o modo de preparo da amostra praticamente não influenciou na curva Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação. Os resultados indicam que o modo de preparo não influenciaria nos testes de maneira significativa.

Na verdade esta afirmação é parcialmente correta, pois devido ao grande tempo para se saturar as partículas de argila, as amostras que são ensaiadas em um tempo muito próximo ao preparo (um tempo de até 48 horas), o modo de preparo influencia de maneira considerável no comportamento reológico da mistura. Já para misturas ensaiadas após um grande tempo de repouso (mais de 48 horas) o modo de preparo pouco influencia na curva de escoamento, pois todos os grãos de argila já estão saturados. **Para a realização dos ensaios que serão descritos a seguir procedeu-se da seguinte forma:** Amostras com as mesmas concentrações em volume foram preparadas e deixadas em repouso por diferentes tempos antes de serem ensaiadas. Quando da realização dos ensaios, em cada uma das amostras, foram aplicados testes de cisalhamento simples consecutivos até atingirem os mesmos patamares de resistência.

Na Figura 36 podem ser observados os primeiros e segundos ensaios com uma amostra com concentração em volume de 15% para diferentes tempos de repouso (1, 2 e 35 dias), a partir do preparo da amostra. Pode-se notar o ganho de resistência nas curvas com o passar do tempo e com a seqüência da realização dos ensaios.

Considerando que a amostra ensaiada com repouso de 35 dias está próxima à máxima resistência que esta amostra pode atingir e, considerando também que o ensaio de cisalhamento pode ser visto como uma forma de mixagem, depreende-se da Figura 37, as seguintes análises:

- Para se atingir resistências próximas à resistência do primeiro ensaio com 35 dias de repouso, a amostra ensaiada com 24 horas precisou ser ensaiadas 8 vezes e, a amostra com tempo de repouso de 48 horas, necessitou de 5 ensaios;

- Analisando a forma de mixagens nos ensaios, pode-se concluir que a amostra repousada 1 dia (24 horas) teve uma mixagem mais vigorosa (daí 8 vezes) que a amostra repousada 2 dias (48 horas), para se atingir a resistência da amostra repousada durante longo tempo (35 dias).

Assim, para tempos de repouso relativamente curtos, o modo de preparo deve influenciar na curva de escoamento da mistura.

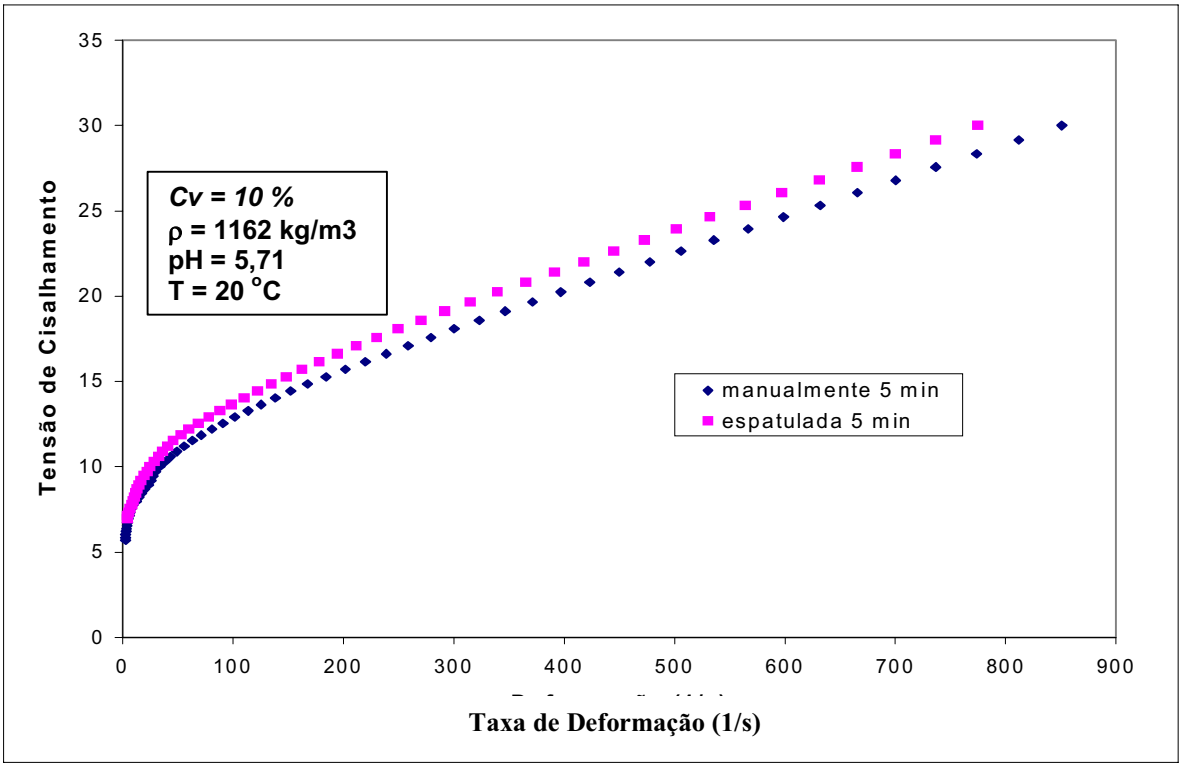


Figura 34: Influência do modo de preparo das misturas para C_v = 10%

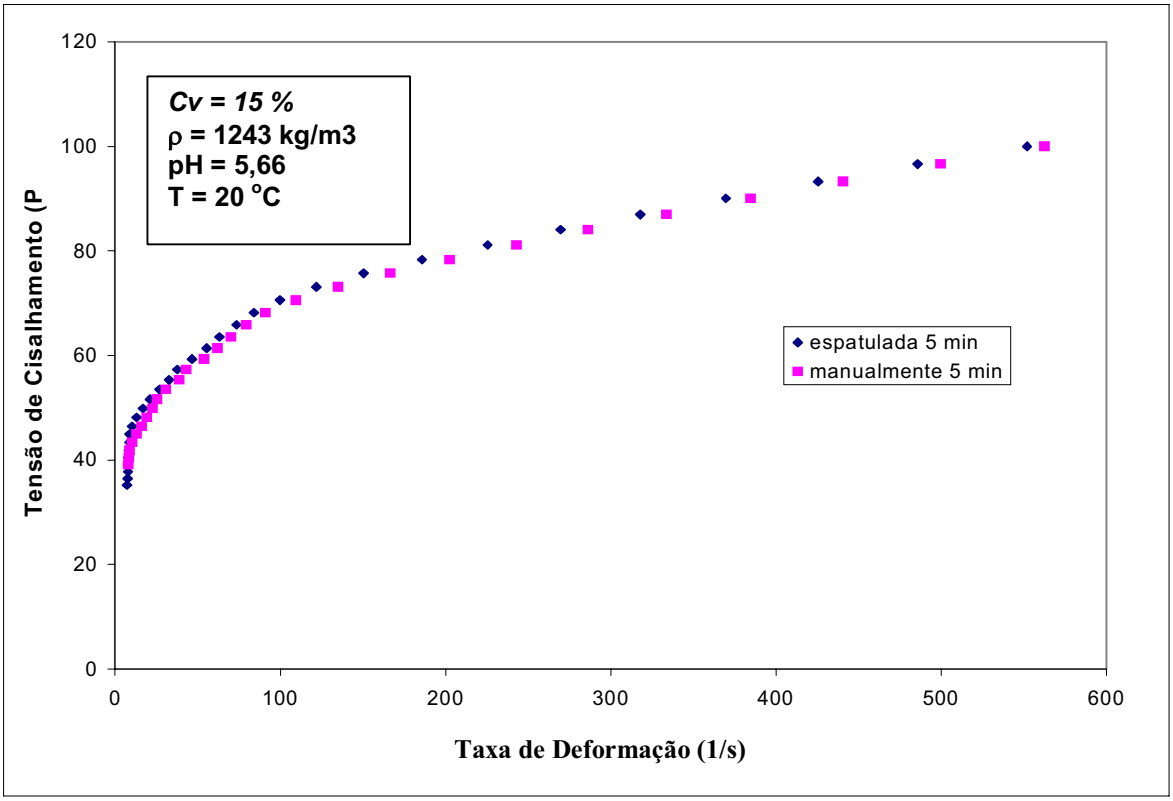


Figura 35: Influência do modo de preparo das misturas para C_v = 15%

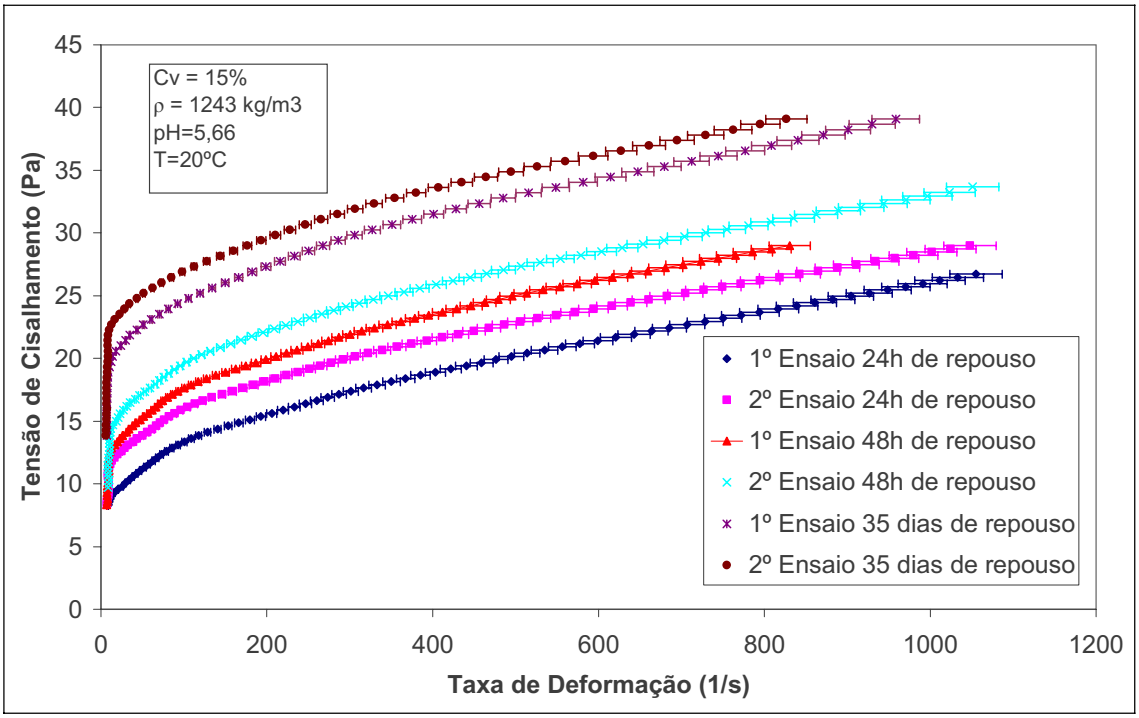


Figura 36: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação para o 1º e 2º ensaios para diferentes períodos de repouso - amostra de C_v = 15% com barra de erros de ± 3%

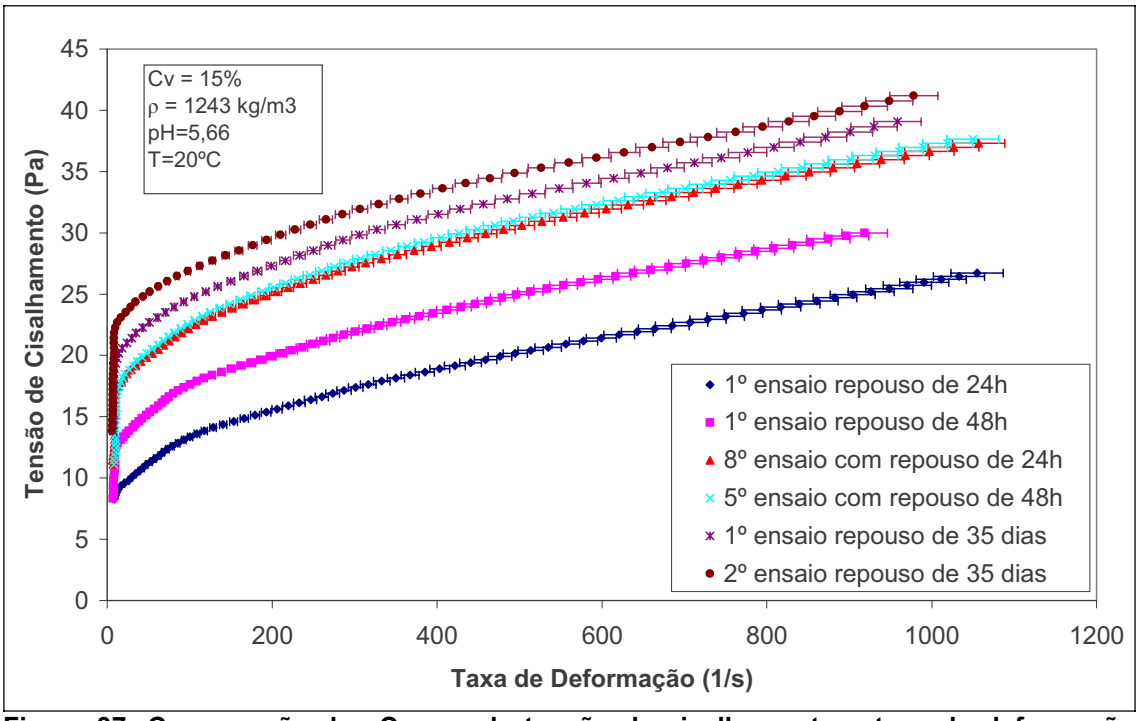


Figura 37: Comparação das Curvas de tensão de cisalhamento x taxa de deformação para uma mesma amostra de C_v = 15% com diferentes tempos de repouso e barra de erros de ± 3%

Com estes resultados sobre o modo de preparo optou-se por, em todos os ensaios, preparar as amostras e deixá-las em repouso por um período de 7 dias (período acima do qual observou, a partir de ensaios diversos, que não ocorreria mais ganho significativo de resistência com o aumento do tempo de repouso) e, após esse período, a forma de agitação é padrão antes dos ensaios.

V.2 - Parte 2

Neste item serão apresentados ensaios reométricos e discussões na busca do entendimento dos processos de sedimentação e ressuspensão dos materiais inertes no interior da massa fluida hiperconcentrada.

V.2.1 - Análise dos efeitos de sedimentação e ressuspensão dos materiais inertes

Nesta fase foram definidos dezesseis tipos de mistura para os ensaios reométricos:

- Mistura intersticial de água+argila com C_v=5% com adição de 5,10,15 e 20% de sólidos granulares (areia) no volume total da mistura;
- Mistura intersticial de água+argila com C_v=10% com adição de 5,10,15 e 20% de sólidos granulares (areia) no volume total da mistura;
- Mistura intersticial de água+argila com C_v=15% com adição de 5,10,15 e 20% de sólidos granulares (areia) no volume total da mistura; e
- Mistura intersticial de água+argila com C_v=20% com adição de 5,10,15 e 20% de sólidos granulares (areia) no volume total da mistura.

Na Tabela 8 estão apresentadas as proporções de sólidos totais e porcentagem de finos (argila) em relação aos sólidos totais, bem como o pH de cada uma das dezesseis amostras citadas anteriormente. Como o material granular inserido na mistura é pouco reativo não importa o seu tipo para determinação do pH, apenas a fração adicionada, o pH mostrado na Tabela 8 indica o pH das duas baterias de ensaios.

Tabela 8: Porcentagem de sólidos totais em relação ao volume total da mistura e porcentagem de finos com relação ao volume de sólidos totais

Amostra	Sólidos totais (%)	Fração fina em relação aos sólidos totais (%)	pH
C_v =5% de argila + 5% de areia	9,75	48,70	5,90
C_v =5% de argila + 10% de areia	14,50	31,02	5,87
C_v =5% de argila + 15% de areia	19,31	22,06	5,85
C_v =5% de argila + 20% de areia	24,00	16,65	5,81
C_v =10% de argila + 5% de areia	14,49	65,54	5,40
C_v =10% de argila + 10% de areia	19,00	47,37	5,33
C_v =10% de argila + 15% de areia	23,49	36,17	5,30
C_v =10% de argila + 20% de areia	28,00	28,57	5,22
C_v =15% de argila + 5% de areia	19,24	74,02	5,26
C_v =15% de argila + 10% de areia	23,49	57,44	5,21
C_v =15% de argila + 15% de areia	27,74	46,01	5,19
C_v =15% de argila + 20% de areia	32,00	37,49	5,18
C_v =20% de argila + 5% de areia	24,00	79,19	5,18
C_v =20% de argila + 10% de areia	28,88	64,30	5,11
C_v =20% de argila + 15% de areia	32,00	53,13	5,10
C_v =20% de argila + 20% de areia	36,00	44,44	5,09

V.2.1.1 - Séries de ensaios filmados

Com o objetivo de se observar o efeito de ressuspensão e sedimentação no interior do "*spindle"* foi forjada uma camisa de material acrílico, transparente, que se ajustou adequadamente com o "*spindle"* do tipo CC-45. Utilizando esta camisa foram realizados testes reométricos de cisalhamento simples com pistas de carregamento gradual, ensaiando uma mistura de água+carbopol com adição de areia.

O carbopol é uma substância que, se misturada com água com um pH estabilizado próximo de oito, forma uma mistura com comportamento reológico visco-plástico (seguindo o modelo de Herschel-Bulkley). Em alguns ensaios é conveniente a utilização do carbopol, pois a mistura formada é de um tom acinzentado (quase totalmente translúcida), o que facilita a visualização do comportamento da amostra durante os testes.

A mistura intersticial de água+carbopol, realizada neste trabalho, em caráter qualitativo, foi preparada em duas concentrações, uma concentração diluída e uma outra mais concentrada. Devido à falta de testes preliminares com a mistura de carbopol (esse tipo de ensaio não estava previsto nos testes reométricos) as concentrações em volume das duas misturas intersticiais são desconhecidas, porém tomou-se o cuidado de que as duas amostras em testes de cisalhamento simples gerassem ressuspensão do material.

O material granular utilizado nos ensaios foi a areia retida na peneira 100 e a concentração em volume total das misturas, nas duas séries, foi de 20%. O desconhecimento das concentrações em volume das misturas intersticiais não traz prejuízo as análises desta fase, já que os ensaios são qualitativos e descritivos e não quantitativos.

A mistura intersticial de carbopol+areia diluída foi utilizada na primeira série de ensaios e a mistura mais concentrada na segunda série. Para uma melhor análise dos efeitos de sedimentação e ressuspensão estes ensaios foram gravados por uma filmadora digital de alta precisão (capaz de capturar cerca de 33 imagens no segundo).

Com a filmagem dos ensaios em mãos (utilizando-se uma câmera JVC que pode capturar até 33 frames por segundo) capturaram-se quadros da gravação (isso foi possível com o auxilio de uma placa de captura PINI e do software Adobe Premiere 6.5).

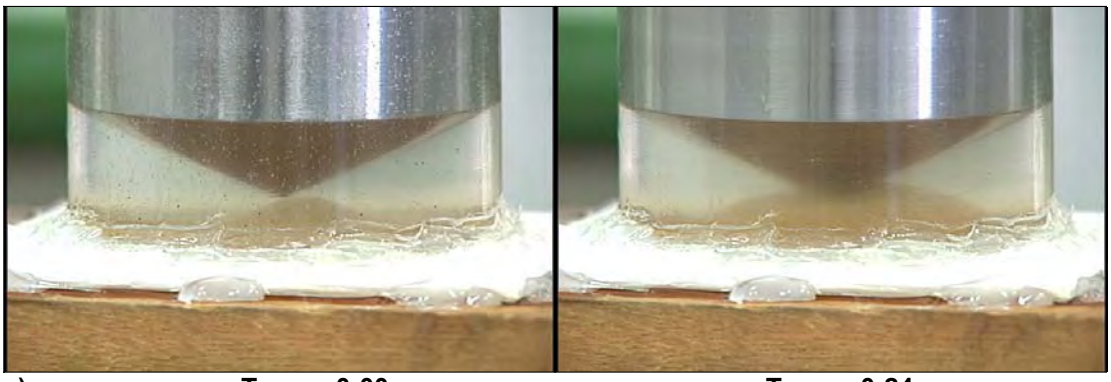
V.2.1.1.1 - Primeira série de ensaios filmados

As imagens capturadas da primeira série de ensaios filmados podem ser vistas nas Figuras 38 e 39, os tempos apresentados abaixo de cada figura indicam os tempos a partir do início do ensaio e estão em minutos e segundos **(min:s)**.

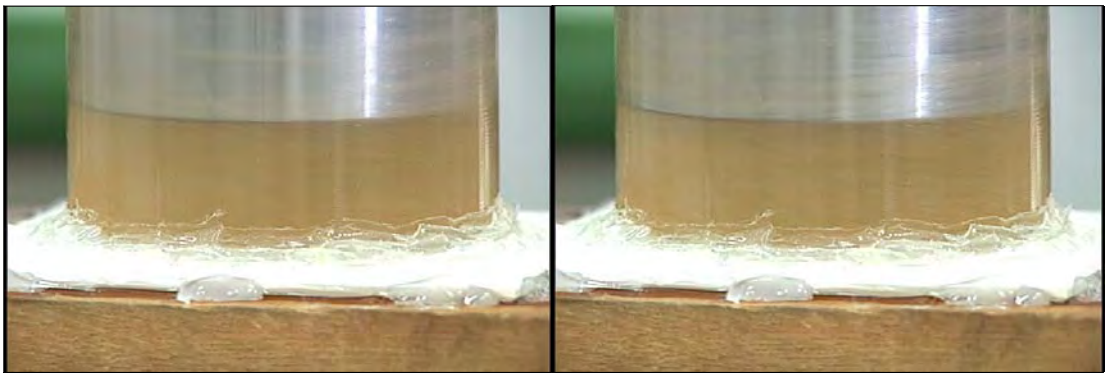
Nesta primeira série, após a deposição do material dentro da camisa de acrílico, todo o material granular se sedimentou. Com o começo do ensaio os grãos depositados inicialmente se moveram como corpos de fundo (Figuras 38a). Acredita-se que esta seja a fase macro-viscosa citada por Bagnold (1954) já que a parte granular do fluido não está em movimento junto com a parte líquida e, a resistência ao movimento é oferecida basicamente pelo fluido intersticial.

Após atingir-se uma taxa de deformação de 500 s^{-1} grande parte do material granular entrou em ressuspensão (Figura 38b), essa fase é considerada como sendo o regime inercial de grãos (BAGNOLD, 1954), o fluido intersticial transmite quantidade de movimento aos grãos e o material granular entra em movimento participando do escoamento. Nesta fase as linhas de correntes podem ser observadas na lateral do "*spindle"*, bem como na parte inferior (região do cone do pino). Com o fim do ensaio (Figura 38c) muito material pode ser encontrado em suspensão no interior da matriz fluida homogênea de água+carbopol (mais material em suspensão se comparado com a figura do início do ensaio).

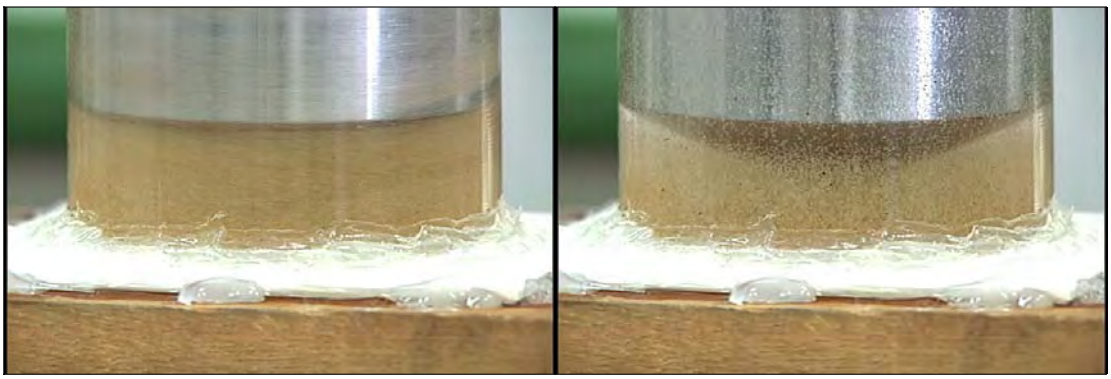
Após o fim do ensaio o material granular suspenso, nessa amostra, começa a sedimentar. A sedimentação pode ser vista na Figura 39, nessa seqüência de figuras um grupo de partículas foi destacado por um círculo vermelho para indicar a sedimentação do material. Sendo um pouco mais flexível na definição anteriormente apresentada de sedimentação que diz: "logo após toda a movimentação dentro do fluido cessar, nenhuma partícula é mantida em suspensão", pode-se supor que haja sedimentação do material, pois após um tempo de 60 segundos nenhuma partícula pôde ser vista, a olho nú, em suspensão.



a) Tempo 0:00 Tempo 0:24



b) Tempo 0:35 Tempo 1:17



c) Tempo 1:19 Tempo 1:26

Figura 38: Série de figuras do primeiro ensaio com camisa transparente para análise de efeitos de ressuspensão e sedimentação – (a) início do ensaio – (b) total ressuspensão – (c) fim do ensaio (Captura de 33 frames por segundo)

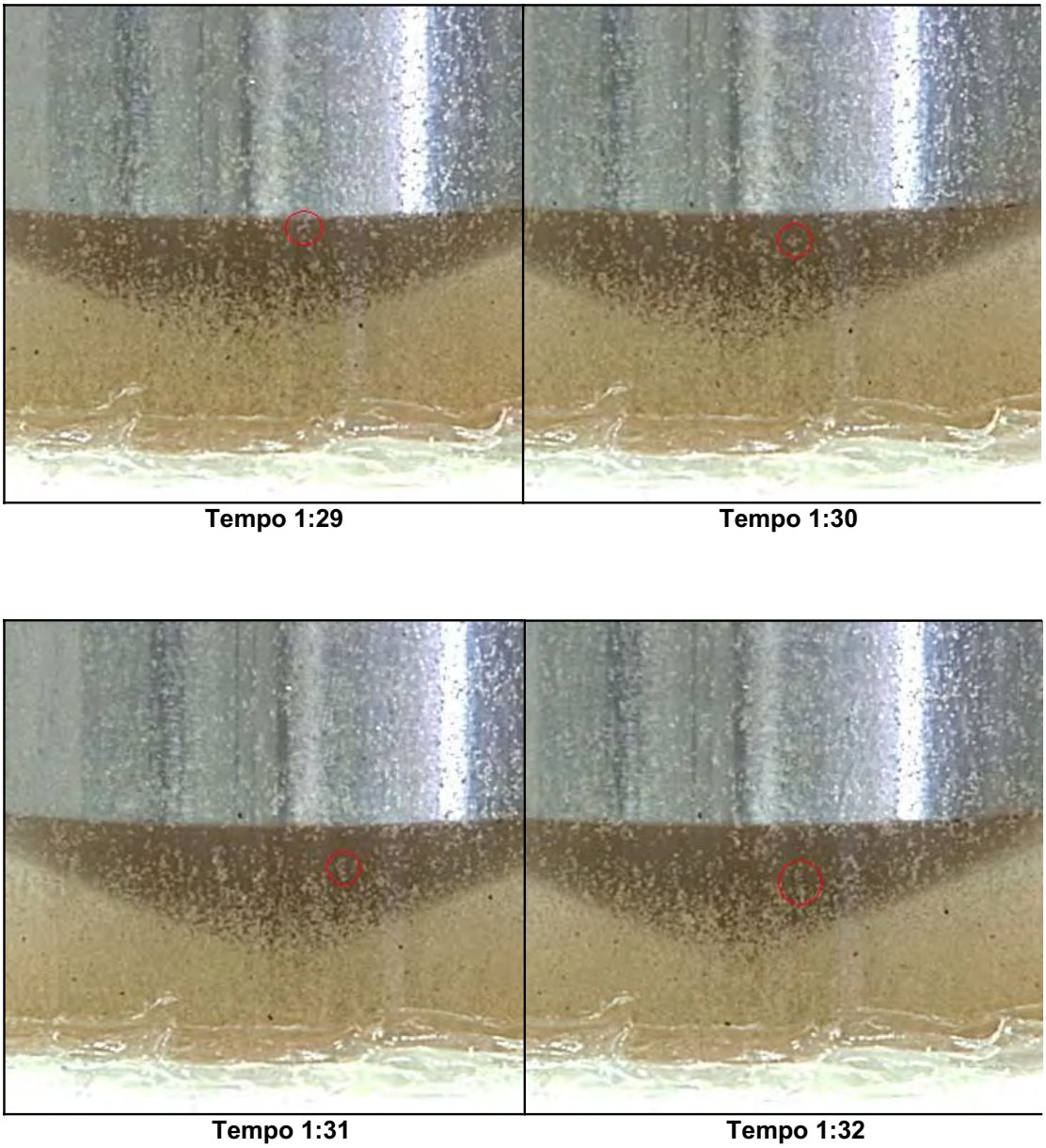


Figura 39: Série de figuras do primeiro ensaio com camisa transparente para análise de efeitos de ressuspensão e sedimentação – distinção de um grupo de grãos em sedimentação após o fim do ensaio (Captura de 33 frames por segundo)

V.2.1.1.2 - Segunda série de ensaios filmados

Na segunda série de ensaios filmados utilizou-se uma mistura intersticial de água+carbopol mais concentrada que na primeira série. Os resultados qualitativos são os mesmos obtidos na primeira parte do ensaio anterior, ocorre o início do ensaio com movimentação de corpo de fundo (Figuras 40a), seguida de uma completa ressuspensão de material granular (Figuras 40b) e, por fim, uma maior quantidade material em suspensão, se comparada com a quantidade inicial do ensaio, (Figuras 40c).

A diferença entre estes dois ensaios é após o fim do movimento do "*spindle"*. Com o fim do cisalhamento o material em suspensão, no fim do ensaio dois, demora um tempo muito grande para se sedimentar, considerando a definição de sedimentação relembrada nos comentários do ensaio 1, supõe-se que não haja sedimentação do material suspenso.

Com o objetivo de se analisar os efeitos desta ressuspensão mantida no interior do fluido intersticial foi realizado um novo ensaio consecutivo (um ensaio seguido sem mudar a amostra, nem retirando-a da "jaqueta acrílica"), nas mesmas condições que foi deixada no fim do teste de cisalhamento simples. Os Resultados deste novo teste estão mostrados na série de Figuras 41.

Pode-se notar a partir da série de Figuras 41 que, com o início do movimento, ocorre uma sedimentação do material mantido em suspensão no fim do teste anterior e na imagem que indica o tempo de 11 segundos a partir do início do novo teste (0:11), pode-se observar que ocorre o equilíbrio entre a sedimentação induzida e a ressuspensão dos grãos.

Este efeito de sedimentação induzida pode ser explicado pelo fato do fluido intersticial ser do tipo Herschel-Bulkley. Os fluidos deste tipo possuem tensões críticas iniciais que devem ser vencidas pelas partículas para que estas sedimentem. Após o início do novo cisalhamento a tensão crítica do fluido é rompida e, considerando a velocidade de queda de uma partícula no interior de um fluido obedecendo a lei de Stokes demonstrada na Equação 07, pode-se supor que a velocidade de queda das partículas e, conseqüentemente, de ressuspensão, não são constantes.

Analisando a Equação de Stokes podemos chegar as seguintes considerações:

- A equação de Stokes não considera a interação entre partículas (é considerada apenas uma partícula esférica em queda livre no interior de um fluido viscoso);

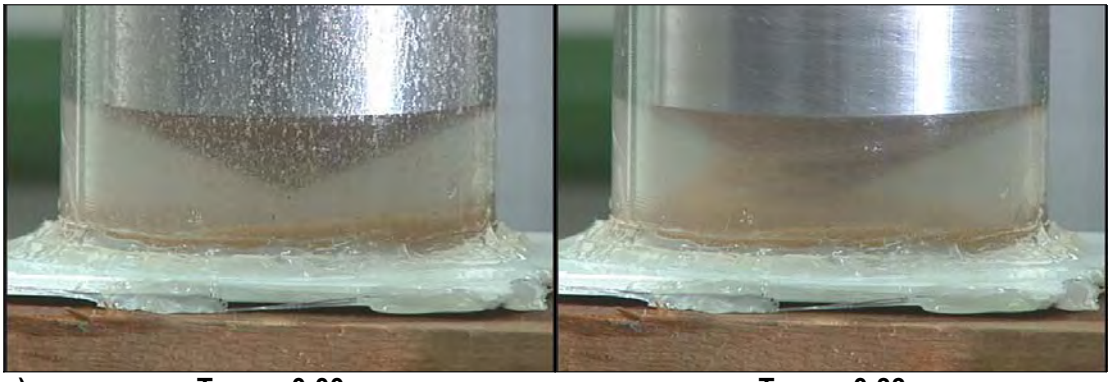
- A massa específica do fluido, quando ocorrem os fenômenos de ressuspensão e sedimentação, varia com o tempo e a taxa de deformação, logo se tem $\rho_f(t ; \dot{\gamma})$;

- Para os ensaios em questão o diâmetro das partículas ainda permanece, aparentemente, homogêneo, porém em casos naturais é muito comum a presença de mais de um diâmetro dos grãos, isso pode levar a ressuspensões preferenciais de certos diâmetros em certas taxas de deformações. Este é outro fator que influencia na massa específica do fluido; e

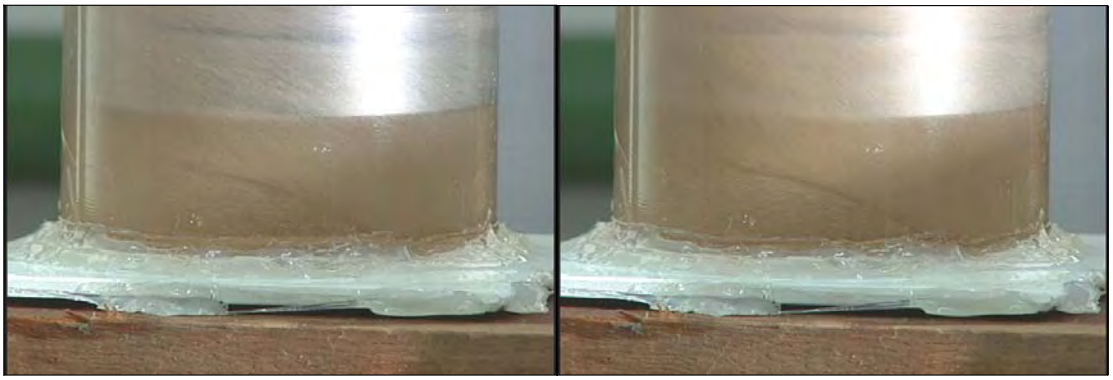
- A viscosidade de fluidos que seguem o modelo de Herschel-Bulkley é variável, como indica a Equação 78 ($\frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \mu_{ap} = \frac{\tau_c}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1}$).

Com base nos resultados obtidos e nas análises feitas anteriormente, pode-se concluir que a proporcionalidade direta ou não da viscosidade em relação à faixa de taxas de deformação deve ser rediscutida, a saber: a viscosidade é inversamente proporcional quando se considera que com o aumento da taxa de deformação a viscosidade do fluido intersticial diminui. Por outro lado o aumento da taxa de deformação causa a ressuspensão de materiais granulares e isso eleva a viscosidade da amostra, por este lado a viscosidade é "diretamente proporcional" a taxa de deformação, pela nova condição do fluido dentro do "*spindle*". Para analisar qual é o efeito da taxa de deformação sobre a viscosidade deve-se determinar qual efeito predomina na amostra ensaiada (tanto um como o outro pode se sobressair, isso dependerá do tipo de fluido intersticial e da quantidade de material granular no volume total da mistura).

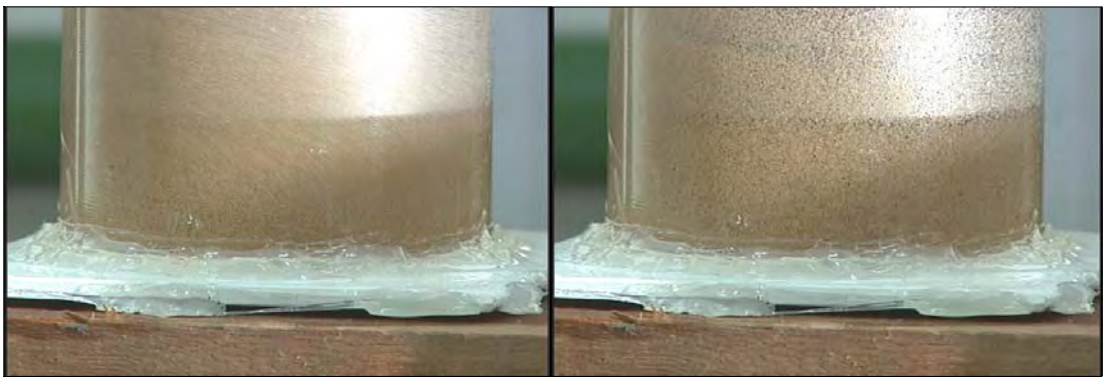
Um outro efeito que deve ser considerado é que, com o aumento da taxa de deformação, a massa específica do fluido aumenta e o termo (ρ_s - ρ_f) da Equação de Stokes diminui. Dessa forma a velocidade de queda é inversamente proporcional a taxa de deformação. Assim pode-se concluir que o principal agente que atua sobre a velocidade de queda das partículas no interior da mistura é a taxa de deformação (para partículas de mesmo diâmetro) e essa influência deve ser analisada para cada caso; além disso, deve ser estudado qual é a sensibilidade do processo de sedimentação e da ressuspensão para os parâmetros viscosidade e empuxo (indicado por (ρ_s - ρ_f)).



a) Tempo 0:00 Tempo 0:33



b) Tempo 0:46 Tempo 0:57



c) Tempo 1:19 Tempo 1:22

Figura 40: Série de figuras do segundo ensaio com camisa transparente para análise de efeitos de ressuspensão e sedimentação – (a) início do ensaio – (b) total ressuspensão – (c) fim do ensaio (Captura de 33 frames por segundo)

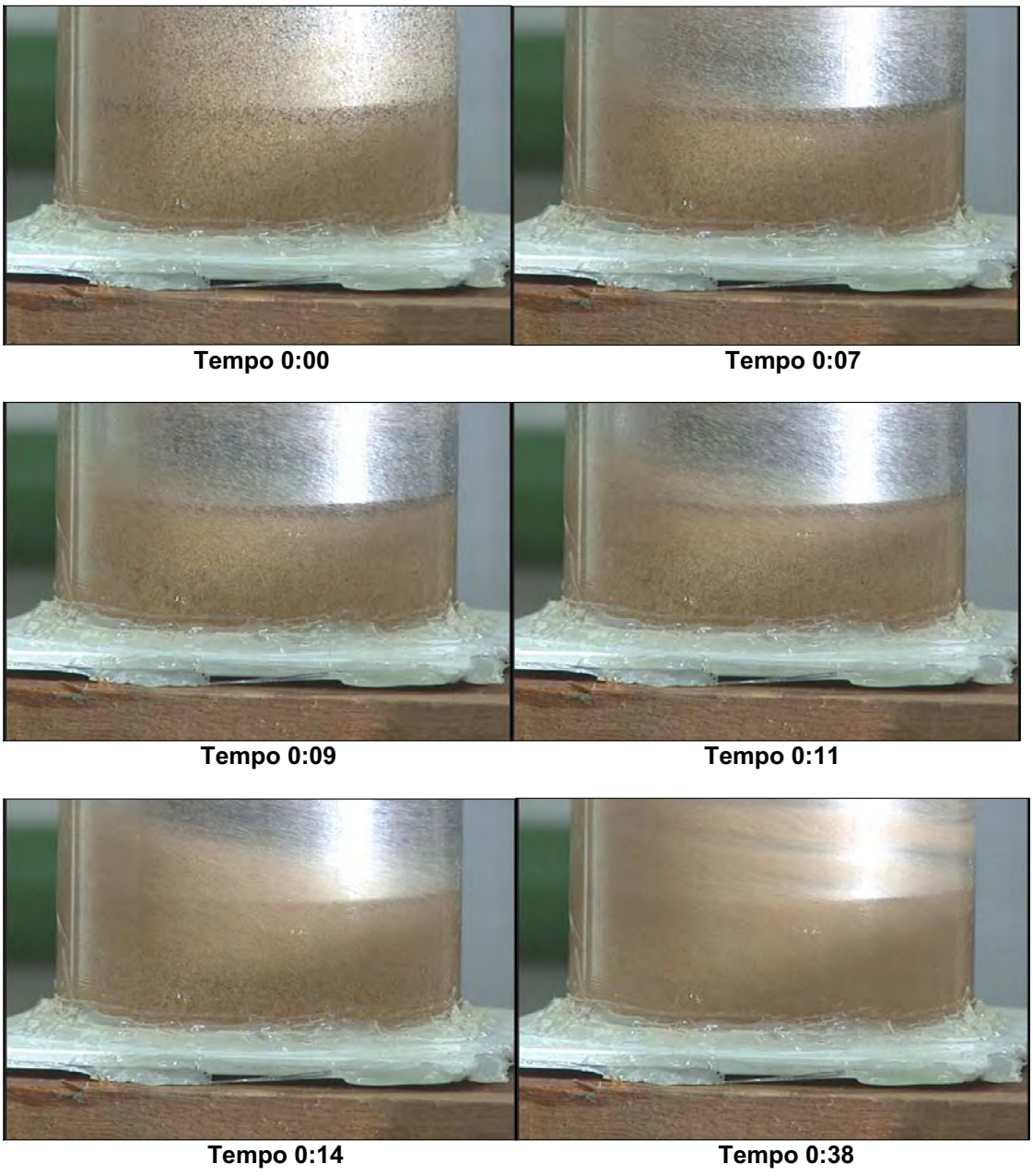
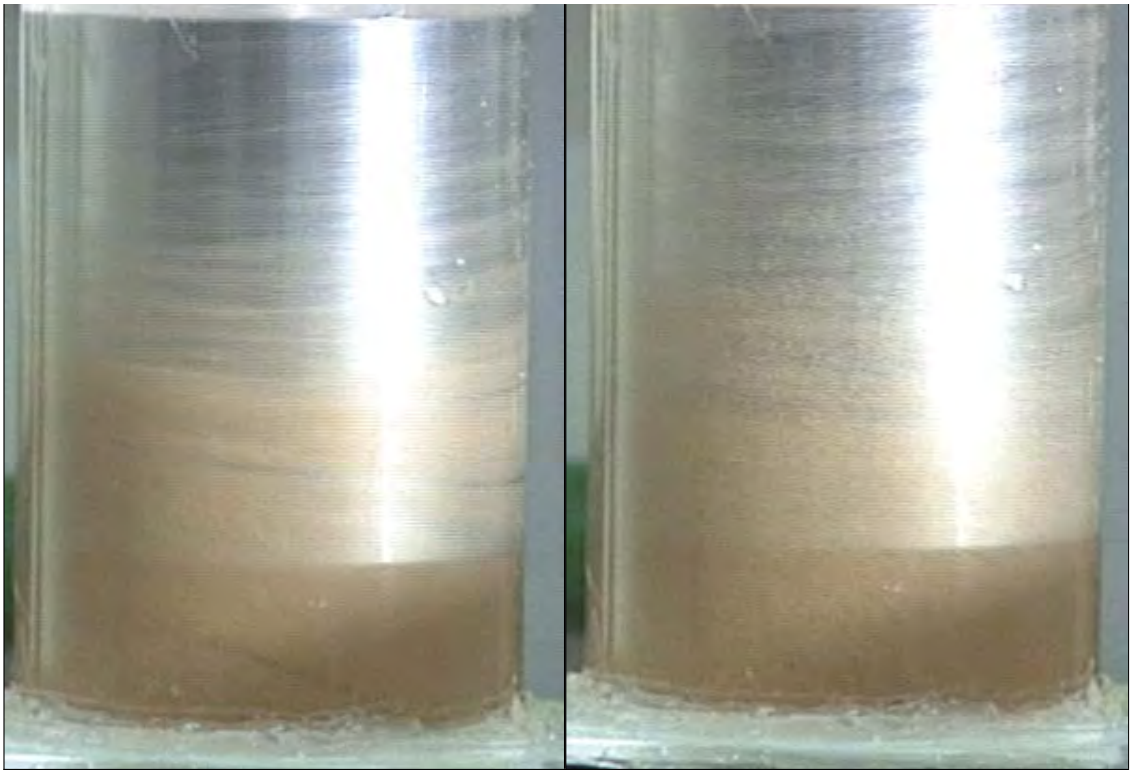
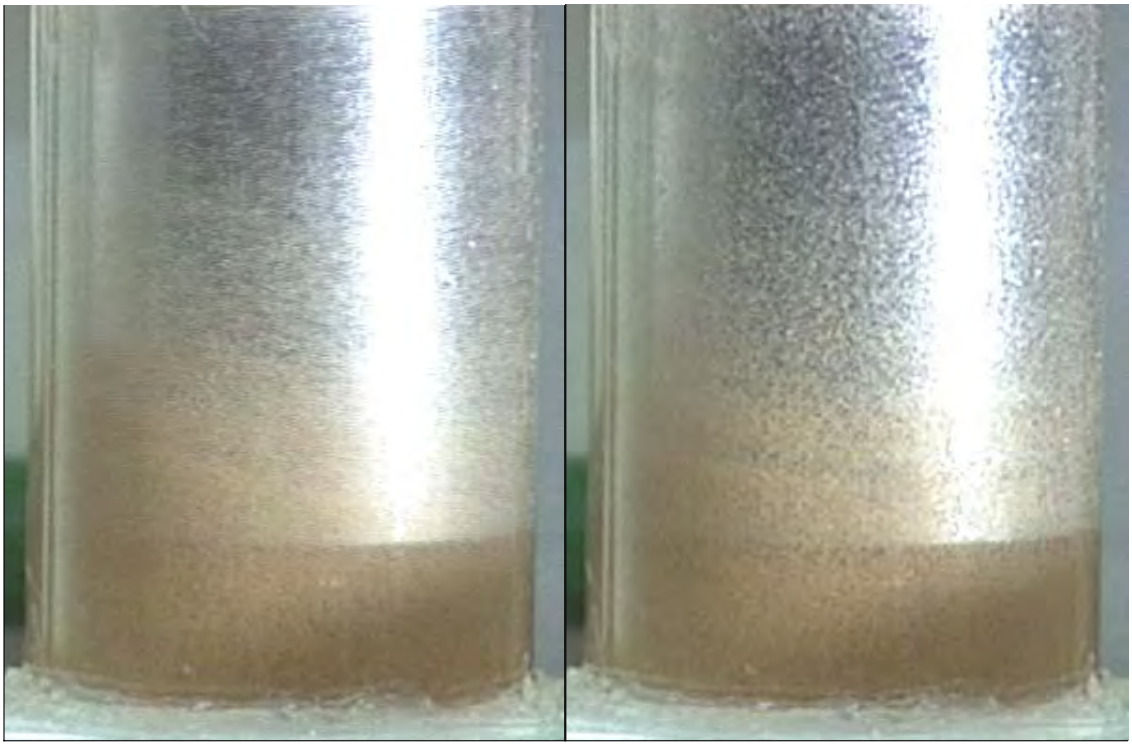


Figura 41: Sedimentação induzida de material granular suspenso após início de teste de cisalhamento simples (Captura de 33 frames por segundo)

Uma melhor visualização das linhas de corrente formadas no fluido durante o cisalhamento pode ser feita nas Figuras 42 (continuação do segundo teste do ensaio dois).



a) Tempo 0:54 Tempo 0:56



b) Tempo 1:16 Tempo 1:19

Figura 42: (a) visualização das linhas de corrente - (b) fim do teste com material em suspensão (Captura de 33 frames por segundo)

Para efeito de comparação, na Figura 43, foram plotadas as curvas de escoamento referentes às Figuras 38, 40 e 41. Os pontos de quebra em cada uma das curvas indicam os pontos de ressuspensão indicados nas figuras.

Deve-se lembrar que as curvas apresentadas não possuem consistência quantitativa, pois a camisa utilizada nesses ensaios não foi calibrada para o reômetro. Porém as configurações das curvas são muito semelhantes às curvas ensaiadas com as camisas utilizadas pelo equipamento, isso demonstra que, qualitativamente, os resultados podem ser representativos.

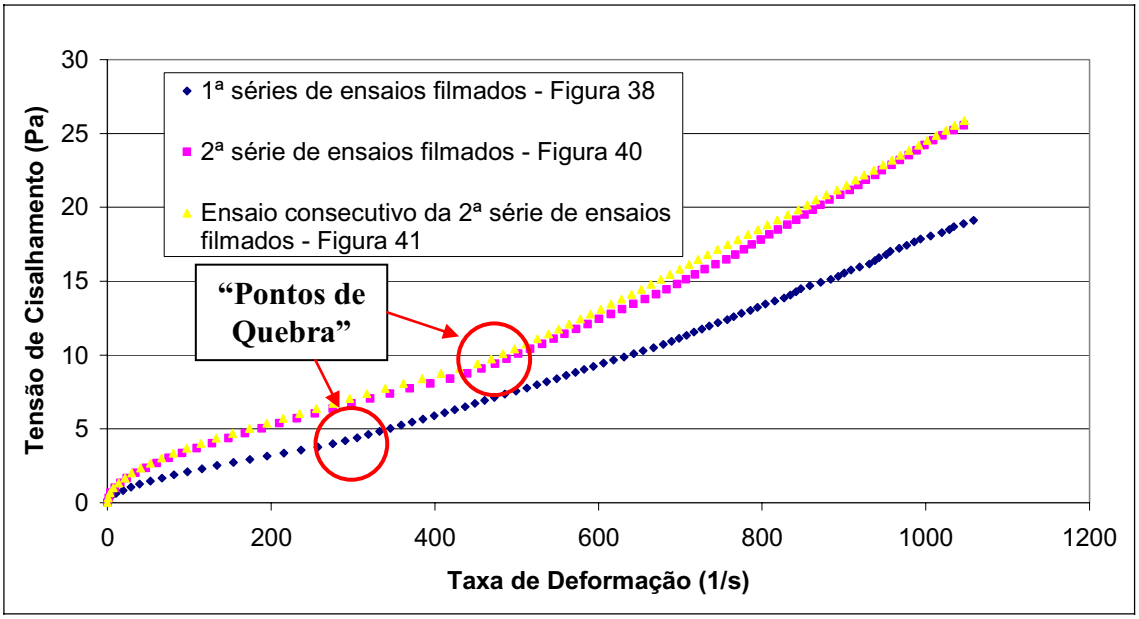


Figura 43: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação das duas séries de ensaios filmados – mistura intersticial de água+carbopol

V.2.2 - Ensaios reométricos

Nas análises reométricas iniciais optou-se por utilizar, nas misturas, sólidos inertes com diâmetro médio constante. Dessa forma, foram realizadas duas baterias de ensaios, a saber:

Bateria de ensaios 1 – na 1ª bateria de ensaios as dezesseis amostras citadas foram preparadas com areia retida na peneira 60 (diâmetro médio de 0,25mm). Foram realizados ensaios consecutivos com a mesma amostra da seguinte forma: a quantidade de amostra especificada pelo fabricante para realização do ensaio foi colocada no "*spindle*", o procedimento de ensaio é ajustado no software Reo2000 e o ensaio tem início. Após o fim do ensaio os dados são salvos e um novo ensaio é iniciado imediatamente (sem retirar a amostra do "*spindle*") esse procedimento é tomado para que possam ser analisados, reometricamente, efeitos de sedimentação e ressuspensão das partículas inertes da mistura.

Em cada uma das dezesseis misturas citadas anteriormente foram realizados ensaios mantendo-se o ajuste de carregamento inalterado, por exemplo: Para os ensaios de mistura intersticial de C_v =5% e 5% de areia realizaram-se, em todos os ensaios consecutivos para essa série, um carregamento variando de 0 – 12Pa em 120 segundos. Já para os ensaios de mistura intersticial de C_v =5% e 10% de areia realizou-se, em todos os ensaios consecutivos desta série, um carregamento variando de 0 – 13Pa em 120 segundos.

Para todas as outras misturas foi definido um valor máximo de carregamento no tempo de 120 segundos e, para essa configuração, foram realizados os respectivos ensaios de carregamento.

Também para analisar efeitos de sedimentação, após os ensaios consecutivos de cada mistura, a amostra permanecia em repouso dentro do "*spindle*" por 10 minutos (tempo observado para o qual todas as partículas já haviam se sedimentado) e, então, um novo ensaio de cisalhamento com a amostra repousada era realizado (mantendo-se o padrão de carregamento).

Bateria de ensaios 2 – nesta segunda bateria de ensaio as dezesseis amostras foram preparadas com areia retida na peneira 100 (diâmetro médio de 0,15mm). Da mesma forma que para a primeira bateria de ensaios foram realizados ensaios consecutivos, porém cada novo ensaio de uma mesma série teve um novo ajuste de carregamento (no tempo máximo de 120 segundos) no software Rheo2000 de tal forma a manter as deformações próximas à deformação máxima de 1050 s^{-1}.

Além de testes de cisalhamento simples também foram realizados ensaios com faixas de carregamento uniformes (carregamento a fim de se manter as amostras próximas à faixa de deformações máximas) para analisar a variação da viscosidade em função do tempo.

O fabricante do reômetro recomenda que para teste reométricos com misturas contendo material granular, o diâmetro das partículas seja, no máximo, da ordem de 1/10 do "*gap*" do "*spindle*" (o "*gap*" do "*spindle*" é o espaço entre a camisa e o "spindle"). Os únicos "*spindles*" que obedecem esta especificação são o "*spindle*" cc-25 e o "*spindle*" cc-45. Optou-se por utilizar o

"*spindle*" cc-25 (que possui um "*gap*" menor que o cc-45) apenas nas amostras com fluido intersticial de 20% de argila em concentração em volume.

V.2.2.1 - 1ª Bateria de ensaios

Nos gráficos representativos dos ensaios com adição de areia retida na peneira 60 foram plotadas as curvas dos seguintes ensaios, em cada uma das séries: primeiro ensaio, último ensaio e ensaio com repouso de 10 minutos. Essas curvas foram escolhidas para demonstrar a variação das curvas em função dos carregamentos consecutivos (possíveis efeitos de ressuspensão devido à mixagem sem ocorrer à sedimentação) e a sedimentação do material granular após o repouso (analisando a variação da configuração da última curva em relação à curva ensaiada após o repouso).

Para verificar a correlação do número adimensional **N** com a ocorrência ou não da sedimentação foram determinados os valores de **N** das amostras ensaiadas experimentalmente. Os dados utilizados e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Dados de fluidos intersticiais de água+argila

Concentração em volume da mistura intersticial (%)	τ_C (Pa)	Massa específica do fluido (kg/m^3)
5	0,010	1081
10	0,629	1162
15	16,112	1243
20	148,500	1324

A amostra de areia utilizada foi peneirada e retida na peneira 60 (diâmetros médios de 0,25mm), a densidade dos grãos de areia era de 2670 kg/m^3. Os resultados dos valores de **N** (Equação 34) obtidos são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10: Valores de N e comparação com ocorrências de sedimentação nos ensaios

Mistura intersticial (%)	Peneira de areia retida	ρ' (kg/m^3)	N		Ocorrência de sedimentação no ensaio
5	60	1589	259,801	> 1	Sim
10		1508	3,920	> 1	Sim
15		1427	0,145	< 1	Não
20		1346	0,015	< 1	Não

V.2.2.1.1 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 5% de argila – areia retida na peneira 60

Para a série de ensaios com fluido intersticial com C_v=5% e adição de 5 e 10% de areia (Figuras 44 e 45) nota-se que as curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação, de todos os ensaios, são coincidentes, dessa forma, pode-se concluir que para essas séries de ensaios, ocorrem a ressuspensão do material granular durante o carregamento (a ressuspensão do material é constatada pela característica dilatante da curva, embora está característica nestas curvas seja sutil) e a completa sedimentação de todos os grãos com o fim da agitação provocada pela taxa de deformação.

Já os ensaios com 15 e 20% de areia no volume total da mistura (Figuras 46 e 47) apresentam uma variação das duas últimas curvas em comparação com a primeira, na curva de C_v=5% de água+argila com 15% de areia pode-se notar um ponto de ressuspensão mais acentuado que na curva com 20% de areia. Esta diferença entre as curvas é devido ao fato da amostra com 20% de areia, por possuir uma concentração muito elevada de sólidos e uma baixa porcentagem de finos, formar um fluido homogêneo, constituído de água+areia+argila, já que a cadeia de sustentação dos sólidos é formada basicamente pelos grãos (isso devido à baixa porcentagem de argila).

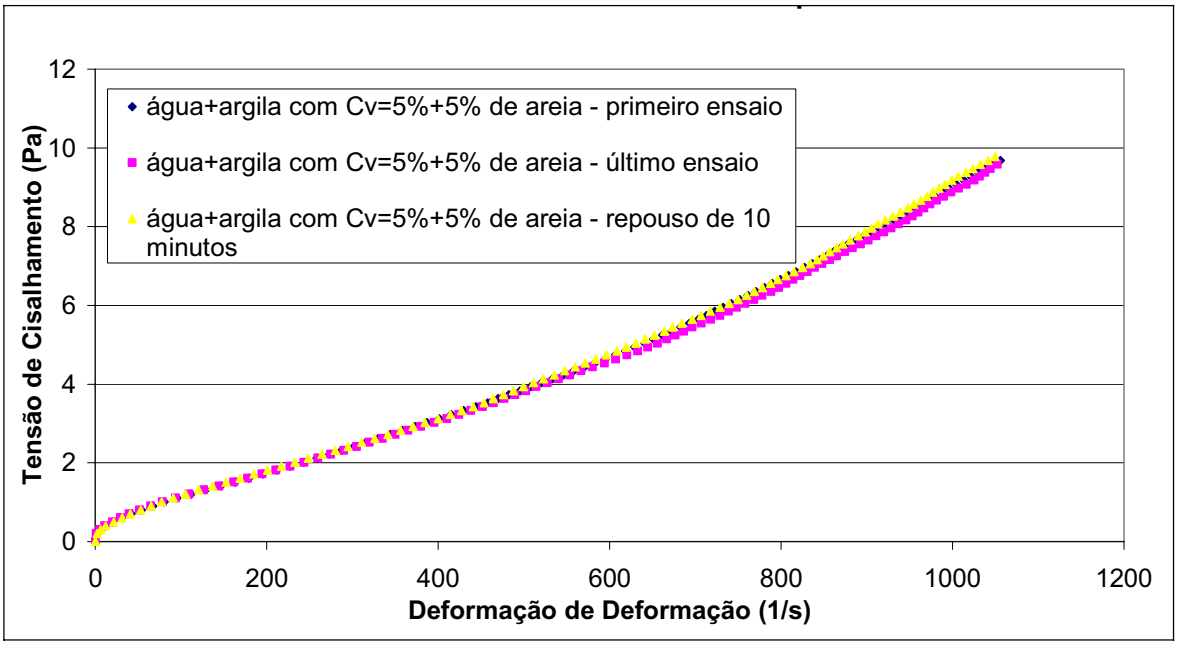


Figura 44: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

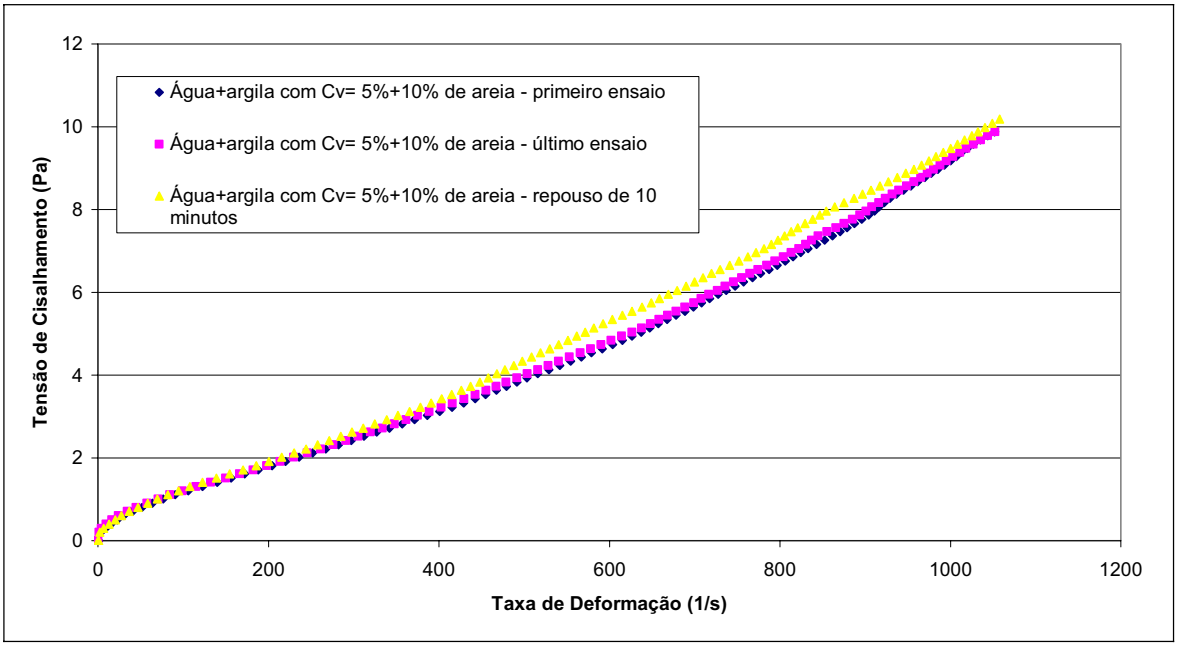


Figura 45: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

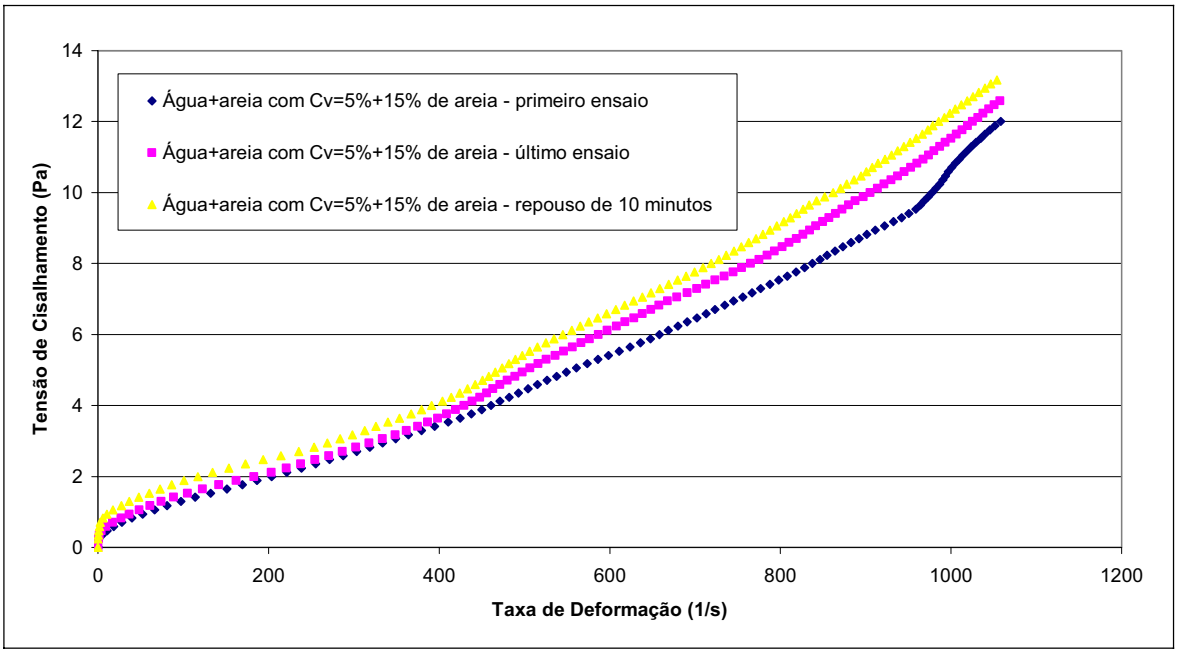


Figura 46: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

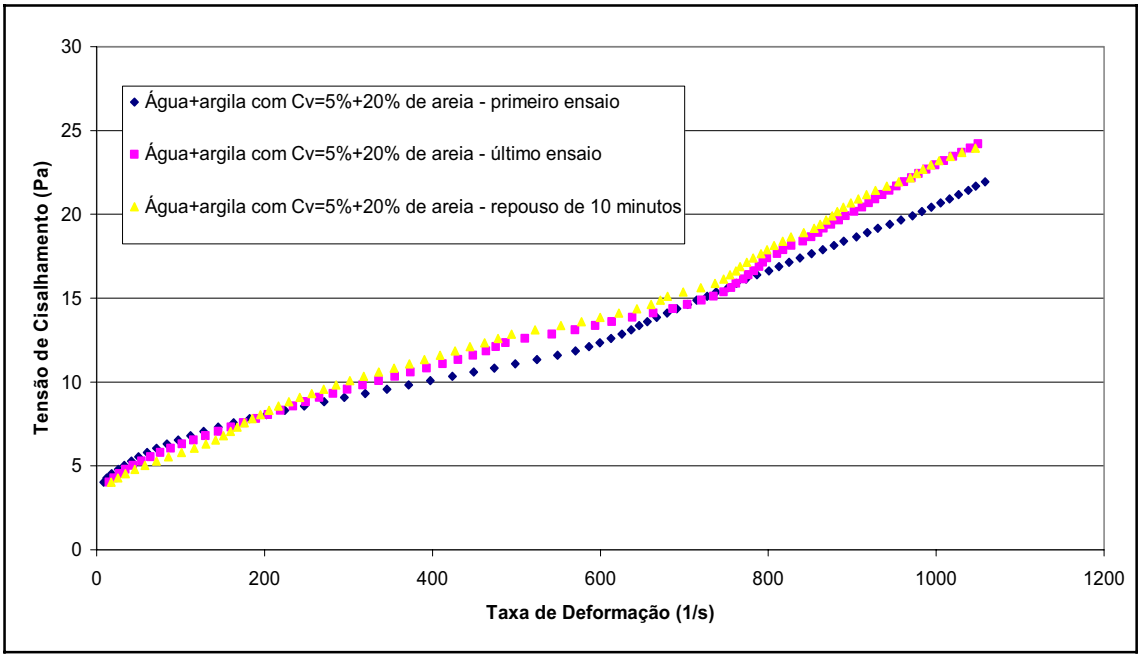


Figura 47: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

V.2.2.1.2 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 10% de argila – areia retida na peneira 60

Para as séries de ensaios com 5 e 10% de areia no volume total da mistura (Figuras 48 e 49), pode-se notar que todas as curvas, em cada uma das séries, apresentam as mesmas configurações sendo pouco deslocadas umas das outras, ou seja, as três curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação das amostras de 5% de areia são ligeiramente deslocadas, verticalmente, umas das outras, este mesmo fenômeno também é observado para as curvas de 10% de areia. Outras características notadas são que, para cada uma destas duas séries de ensaios, as deformações máximas alcançadas são iguais para cada conjunto de três curvas comparadas. Isto demonstra que os ensaios consecutivos não geram, nas amostras, ganhos significativos de resistência.

Também é possível notar que as curvas referentes ao repouso de dez minutos apresentam uma queda na resistência do trecho inicial da curva de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação, porém as resistências finais alcançadas são próximas às máximas. Este efeito indica que o repouso da mistura afeta a região que segundo Bagnold (1954) apresenta um regime macro-viscoso, além disso, também ocorre a sedimentação dos grãos com o

repouso e a ressuspensão após certa taxa de deformação (aproximadamente 600 s^{-1}).

Apesar da queda da resistência ocorrer nas duas séries ensaiadas, a queda é mais acentuada na mistura de 5% de areia, isso pode ser devido à concentração de sólidos totais ser menor nessa amostra.

A série de ensaios da amostra com 15% de areia (Figura 50), já apresenta um ganho de resistência de uma curva para a outra (esse ganho de resistência é indicado pela queda da deformação máxima final de cada curva). O primeiro ensaio desta série apresenta um ponto de ressuspensão que não é mais evidenciado nas demais curvas.

De acordo com Ancey (2002) esta suspensão, assim como os ensaios anteriores com fluido intersticial constituído de água+argila em concentração em volume de 10%, deveria continuar apresentando sedimentação do material granular. Essa diferença entre os valores obtidos nos ensaios reométricos e dos valores esperados por Ancey podem ser devidos a um efeito que não é computado na Equação 34: a influência dos sólidos inertes no comportamento do fluido homogêneo não-newtoniano.

Na realidade, nesta mistura, ainda deve ocorrer sedimentação do material, entretanto a velocidade de sedimentação para a mistura com 15% de adição de areia deve ser menor que para a mistura com 10% de areia que deve ainda ser menor que na mistura com 5% de areia. Essa variação das velocidades de sedimentação deve ser explicada pelo fato de que os sólidos inertes possuem uma área superficial que, assim como nas partículas de argila, também deve ser lubrificada pelo fluido base (água). Com a lubrificação da área superficial dos inertes, menos água deve sobrar para compor o fluido intersticial formado de água+argila, assim a concentração real do fluido intersticial deve ser ligeiramente maior que 10% (para esta bateria de ensaios) e esse aumento deve ser proporcional ao aumento dos sólidos inertes (a análise dos efeitos da influência da granulometria sobre o comportamento da mistura será realizada no **item V.3**).

A não verificação do efeito de sedimentação (indicado pela ressuspensão do material) é devido ao fato dessa série de ensaios ter sido realizada com uma tensão máxima constante, assim, após o primeiro ensaio, ocorre a ressuspensão do material que aumenta a viscosidade global da

amostra e, para que ocorresse uma nova ressuspensão nos cisalhamentos seguintes, seria necessário uma tensão máxima maior que a do primeiro ensaio. Isso se deve ao aumento da massa específica do fluido intersticial.

Ainda, para a mistura com adição de 15% de areia nos sólidos totais, tem-se que a curva de escoamento da amostra após o tempo de repouso de 10 minutos sofre uma queda na resistência na região de regime macro-viscoso (assim como nas séries anteriores).

Já para a série de ensaios com mistura intersticial de C_v =10% de argila e 20% de sólidos inertes no volume total da mistura (Figura 51) nota-se, na parte final da curva do primeiro ensaio, um leve ponto de quebra. Todos os ensaios posteriores apresentaram um aumento de resistência e a curva de escoamento da amostra com repouso de 10 minutos não perde resistência devido ao repouso.

A diferença entre a curva de repouso desta amostra e das outras amostras pode ser devido ao fato da alta porcentagem de sólidos totais gerar uma estrutura capaz de manter as características da última curva de escoamento. Além disso, o aumento da resistência da curva da amostra repousada é maior na amostra com 20% de areia em comparação com o ganho de resistência da curva da amostra repousada com 15% de areia. Este fato é devido a maior quantidade de material inerte que deve ser ressuspenso e, assim, a cada novo ensaio a porcentagem de grãos em suspensão aumenta e, por conseqüência, aumenta a resistência da amostra.

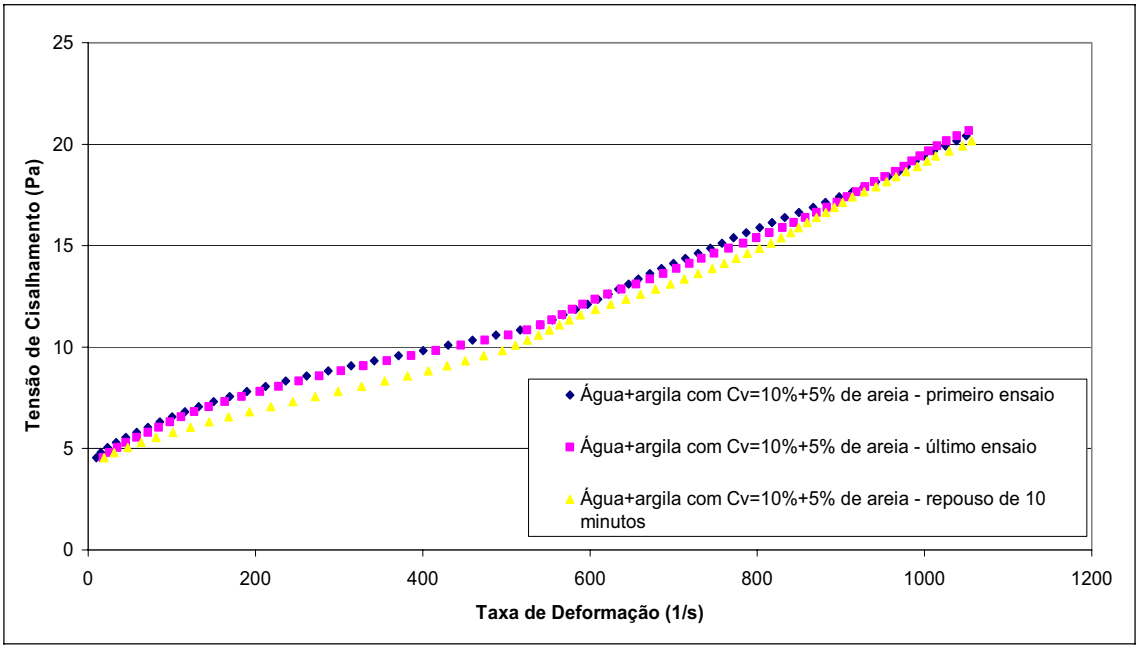


Figura 48: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

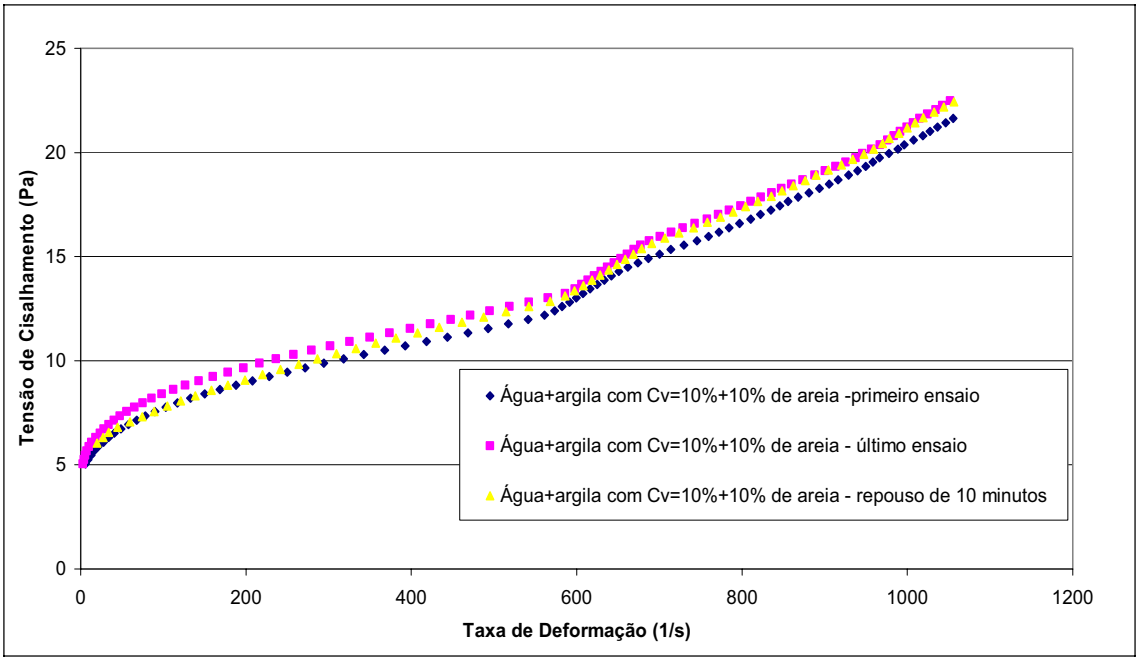


Figura 49: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

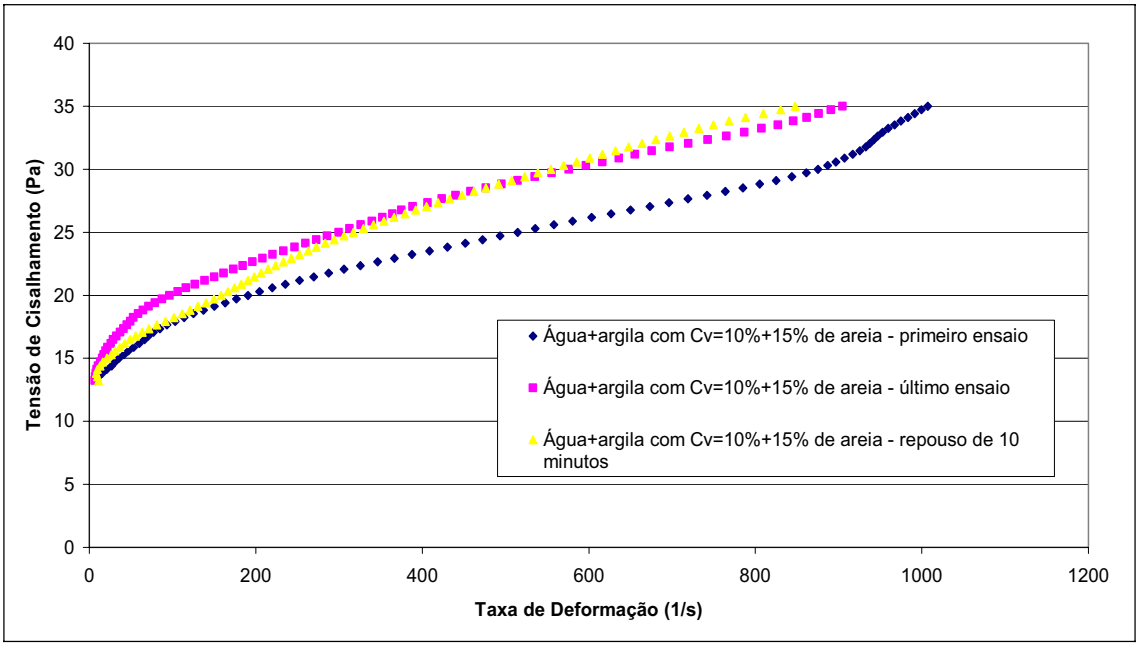


Figura 50: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

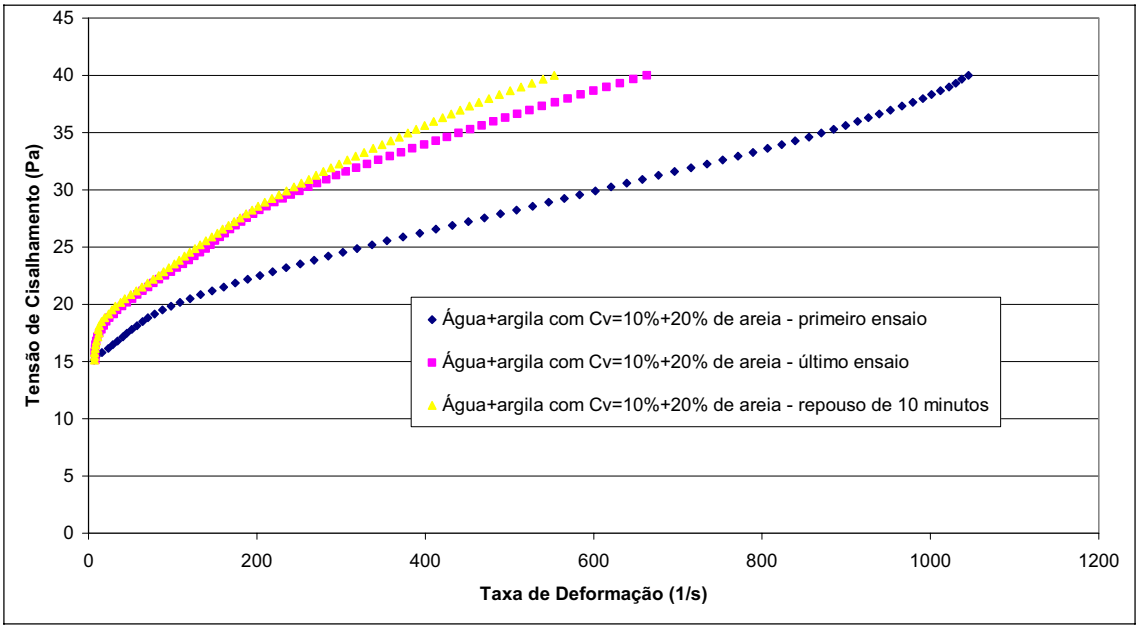


Figura 51: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

V.2.2.1.3 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 15% de argila – areia retida na peneira 60

Com relação as amostras com 15% de argila em volume no fluido intersticial pode-se notar que ocorre um maior ganho de resistência para as amostras com incorporação de 5 e 10% de areia no volume total da mistura (Figuras 52 e 53), se comparados com o ganho de resistência das amostras com adição de 15 e 20% de areia (Figuras 54 e 55). Isto pode ser explicado

devido ao fato das amostras com maior porcentagem de areia necessitarem de maiores tensões para demonstrarem seus ganhos de resistência, pode-se observar que as taxas de deformações máximas alcançadas para as concentrações de 15 e 20% de areia estão entre 200 e 300 s^{-1} (taxas relativamente baixas se comparadas com as taxas máximas alcançadas pelo reômetro de 1050 s^{-1}). Estas baixas taxas de deformações são devidas aos baixos valores de carregamento obtidos pelo "*spindle*" utilizado (CC-45) que pode carregar a amostra no máximo a 196 Pa. Nos ensaios de areia retida na peneira 100 controlaram-se as taxas de deformação próximas as máximas e para estes ensaios serão feitas outras considerações sobre o comportamento dos reogramas.

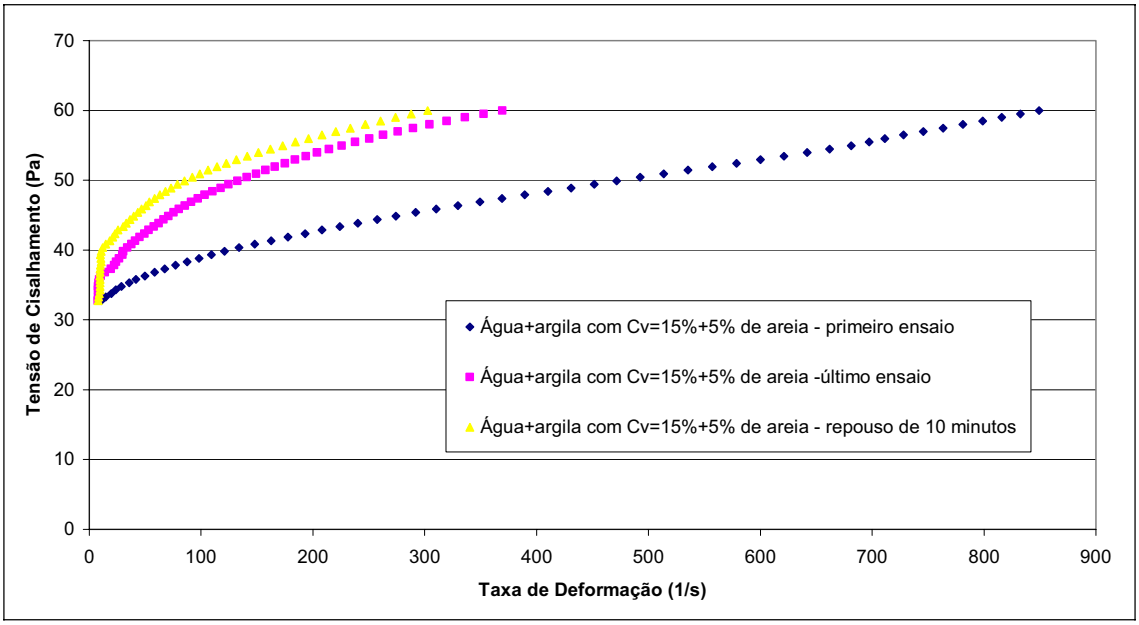


Figura 52: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

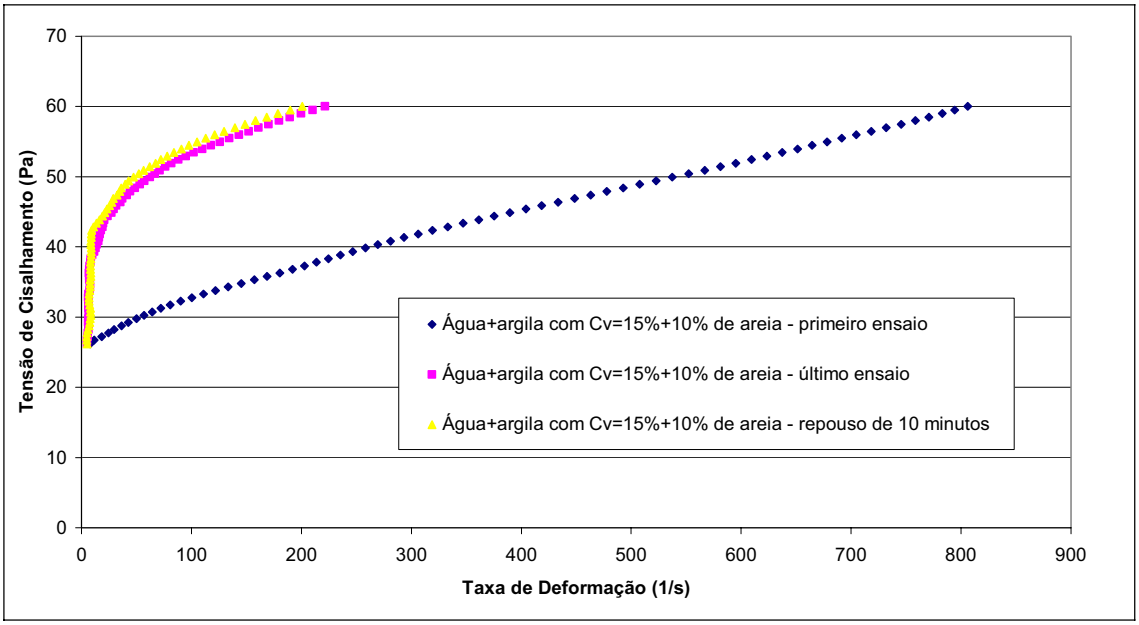


Figura 53: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

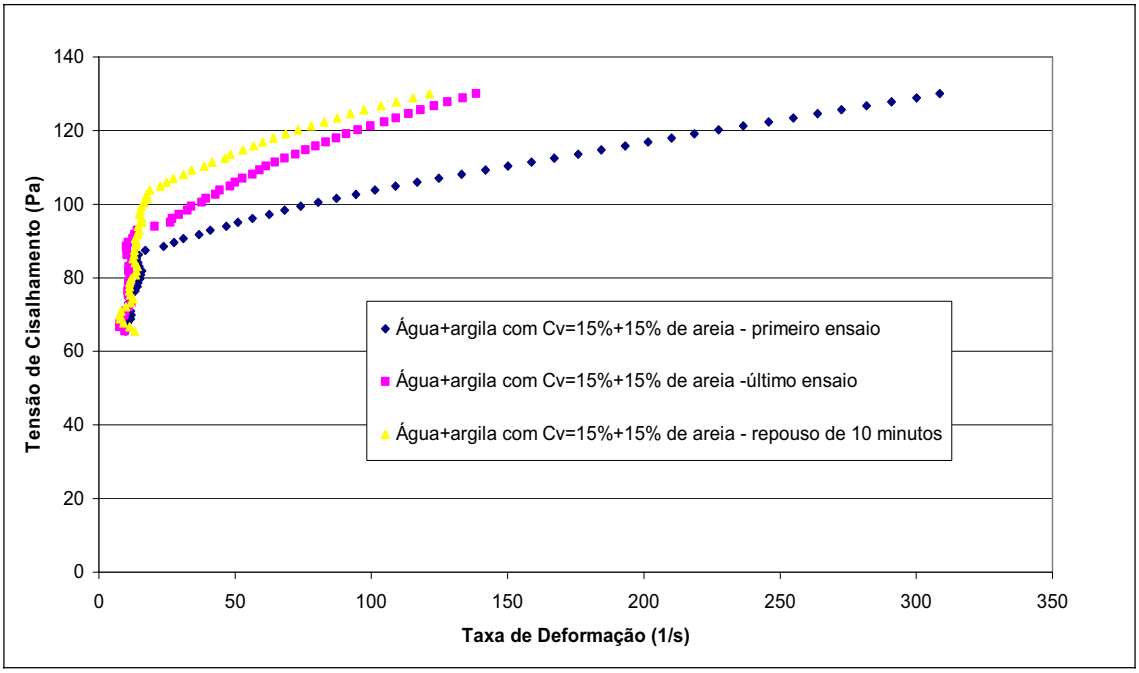


Figura 54: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

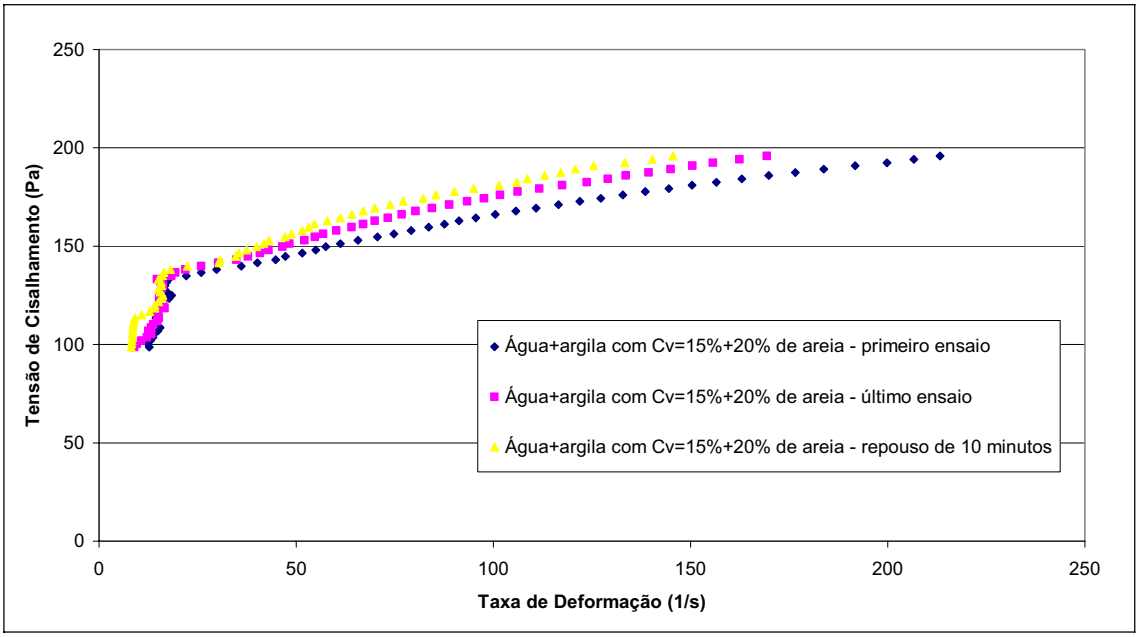


Figura 55: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

V.2.2.1.4 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 20% de argila – areia retida na peneira 60

Para a realização das séries de ensaios com mistura intersticial de 20% de água+argila foi utilizado o "*spindle"* CC-25, isso foi necessário, pois as tensões máximas alcançadas no "*spindle*" CC-45 não eram suficientes devido à alta viscosidade das amostras desta série e os ensaios eram interrompidos por falta de torque do equipamento. Nestas séries de ensaios, devida a alta porcentagem de sólidos e a alta porcentagem de finos nos sólidos totais (os finos nos sólidos totais variaram de 44,44% a 79,19%), todos os ensaios obedeceram a um mesmo padrão (um ganho de resistência nos dois últimos ensaios em relação ao primeiro e as duas últimas curvas muito parecidas). As curvas para cada uma das amostras podem ser vistas nas Figuras 56, 57, 58 e 59.

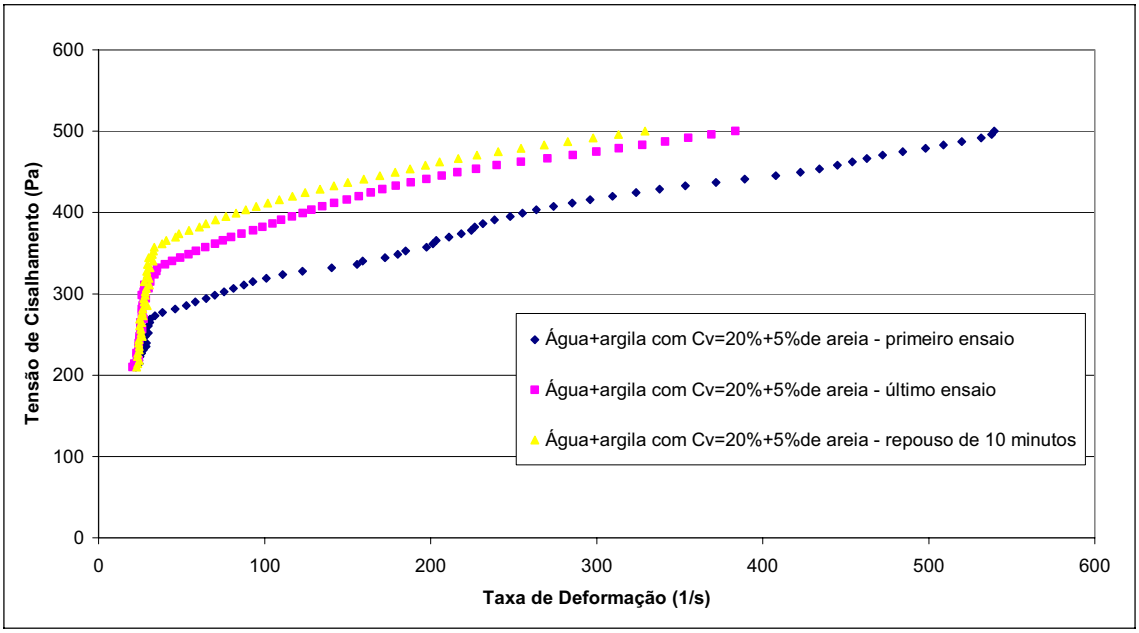


Figura 56: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

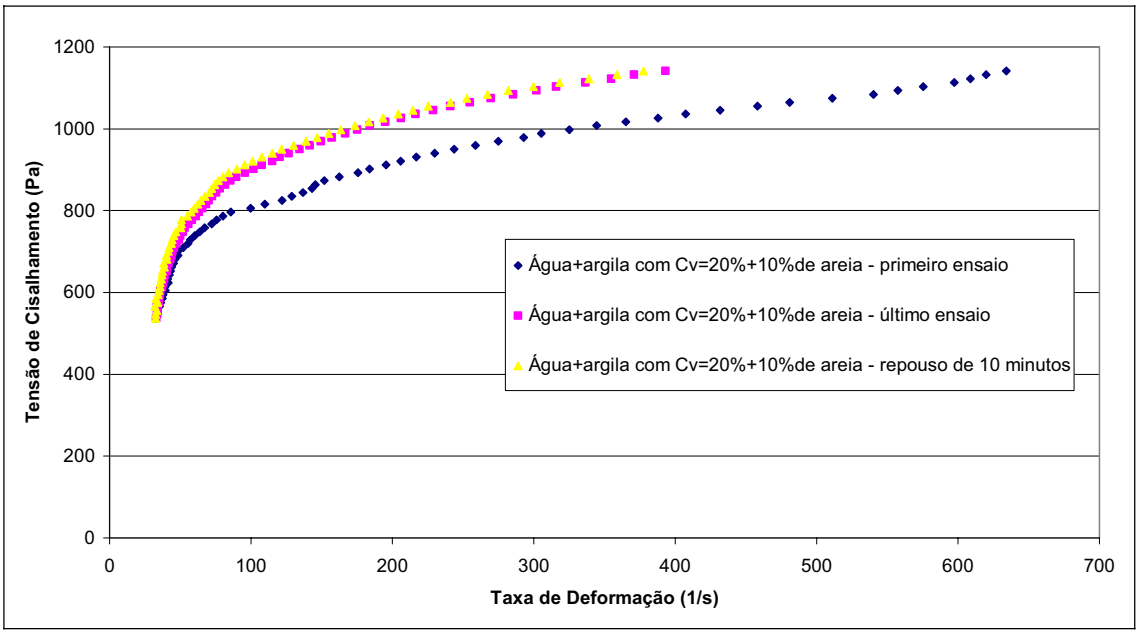


Figura 57: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

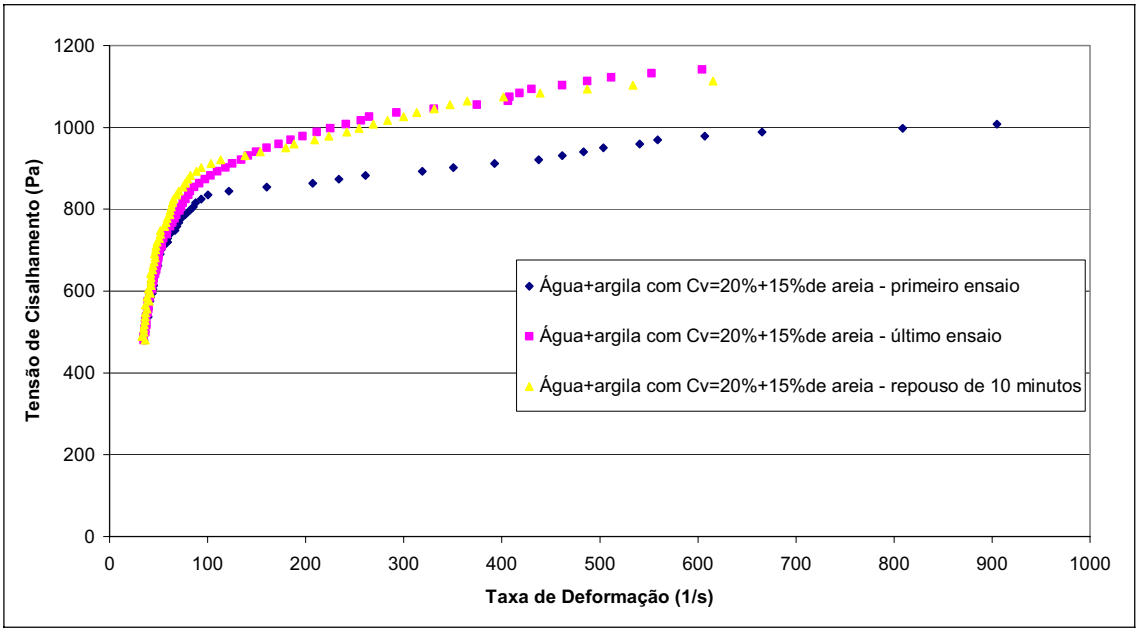


Figura 58: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

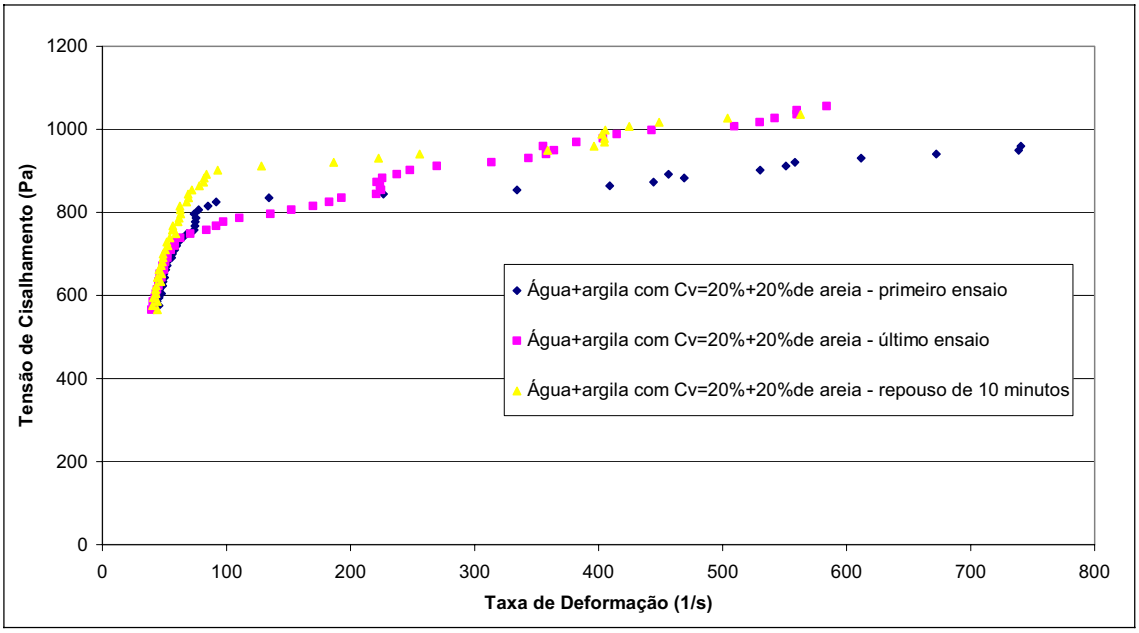


Figura 59: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 60

V.2.2.2 - 2ª Bateria de ensaios

Nos gráficos demonstrativos desta bateria de ensaios são apresentadas as curvas do primeiro, segundo e último ensaios e, em alguns casos, também são apresentadas as curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação dos penúltimos ensaios. O número de ensaios realizados foi definido de acordo com as variações das curvas de escoamento. Os ensaios

eram encerrados quando as curvas dos últimos ensaios não diferiam mais significativamente das curvas dos penúltimos ensaios.

É pertinente lembrar que os ensaios desta segunda bateria foram realizados de tal forma a manter as taxas de deformação próximas as máximas taxas de deformação permitidas pelo equipamento.

Da mesma forma que para a 1º Bateria de ensaios foram determinados os valores de *N* para as amostras ensaiadas nesta 2º Bateria. Os dados utilizados foram apresentados na Tabela 9. As amostras foram preparadas com areia retida na peneira 100, dessa forma o diâmetro médio foi 0,15mm, a densidade dos grãos de areia era de 2670 kg/m^3. Os resultados dos valores de *N* obtidos são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11: Valores de N e comparação com ocorrências de sedimentação nos ensaios

Mistura intersticial (%)	Peneira de areia retida	ρ' (kg/m^3)	N		Ocorrência de sedimentação no ensaio
5	100	1589	155,881	> 1	Sim
10		1508	2,352	> 1	Sim
15		1427	0,087	< 1	Não
20		1346	0,009	< 1	Não

V.2.2.2.1 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 5% de argila – areia retida na peneira 100

Para as amostras com mistura intersticial de 5% de água+argila, pode-se notar que comparando as três curvas de concentração de 5% de areia no volume total das misturas entre si, estas são praticamente coincidentes (isso pode ser constatado na Figura 60). Este mesmo fenômeno também pode ser observado nas curvas com 10 e 15% de areia no volume total das misturas (Figuras 61 e 62). Como já foi comentado na primeira bateria de ensaios com estas mesmas concentrações, este efeito é devido à baixa porcentagem de finos no volume total da mistura o que mantém o fluido intersticial quase totalmente newtoniano, porém as curvas do ensaio de 15% de areia nesta segunda bateria aproximam-se mais que as curvas de 15% de areia da primeira bateria. Isto dever ser devido ao reajuste do carregamento (que já foi comentado anteriormente) e, assim, para todos os ensaios, a quantidade de material inerte em suspensão (nesta mistura intersticial) é sempre máxima.

Já para a série de ensaios com 20% de areia no volume da mistura (Figura 63) pode-se notar que ocorre um ganho de resistência em toda curva de escoamento dos dois últimos ensaios, porém a resistência final adquirida

são as mesmas. Este fato indica a reestruturação do material granular dentro da amostra da seguinte forma: devido a alta porcentagem de grãos dentro da amostra, esses grãos já formam uma cadeia de interação no interior do fluido, com o primeiro teste de cisalhamento essa cadeia, que foi formada pela agitação manual da amostra antes da deposição no copo "*spindle"*, é quebrada e reestruturada. Dessa forma, os ensaios seguintes cisalham a mesma amostra, porém reestruturada, essa reestruturação dos grãos no interior da amostra deve gerar essa variação entre as curvas observadas na Figura 63.

Um outro efeito que deve ser lembrado é que, com o fim do primeiro teste, a porcentagem de material em suspensão (devido a tensão crítica do material) é diferente da porcentagem de material em suspensão após a deposição da amostra no "*spindle"* o que também pode gerar diferenças entre as curvas. Estas últimas teorias apresentadas são reforçadas pelo fato de que os dois últimos ensaios apresentam curvas praticamente coincidentes, pois no fim do antepenúltimo e penúltimo ensaio a estruturação do material granular dentro do "*spindle"* deveria ser a mesma.

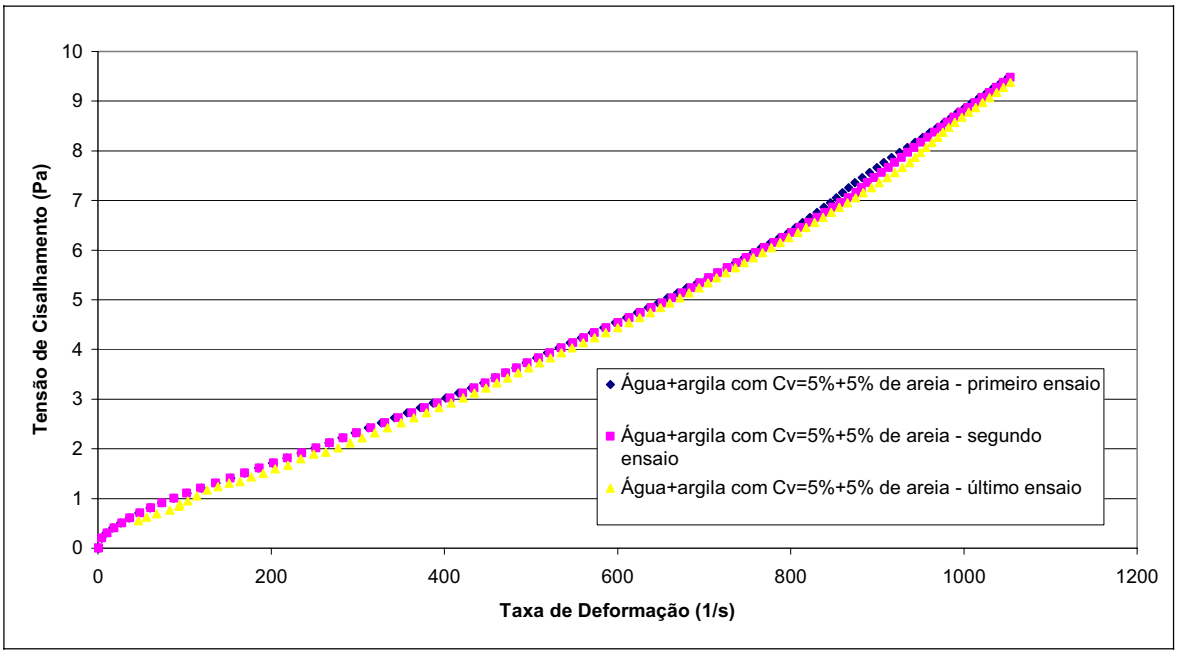


Figura 60: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

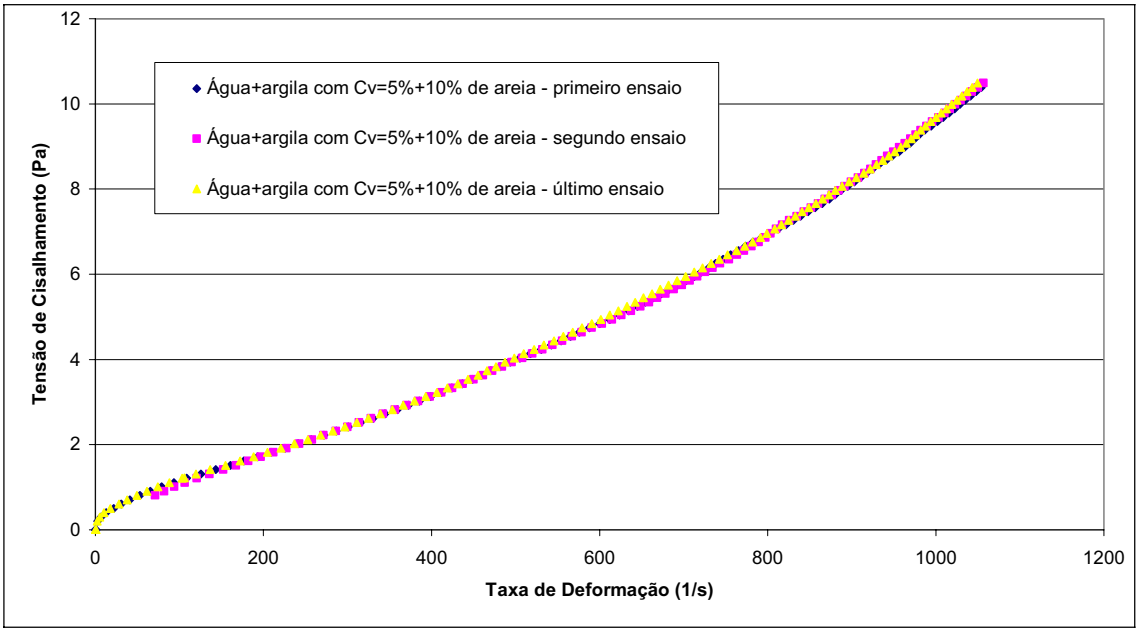


Figura 61: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

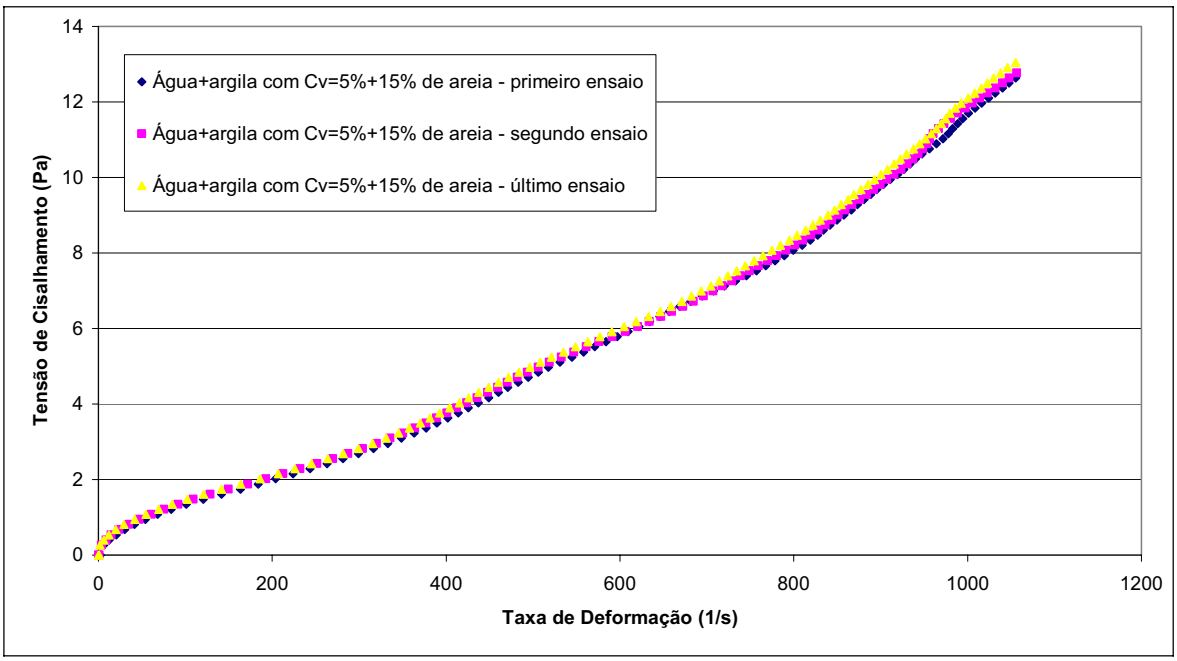


Figura 62: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

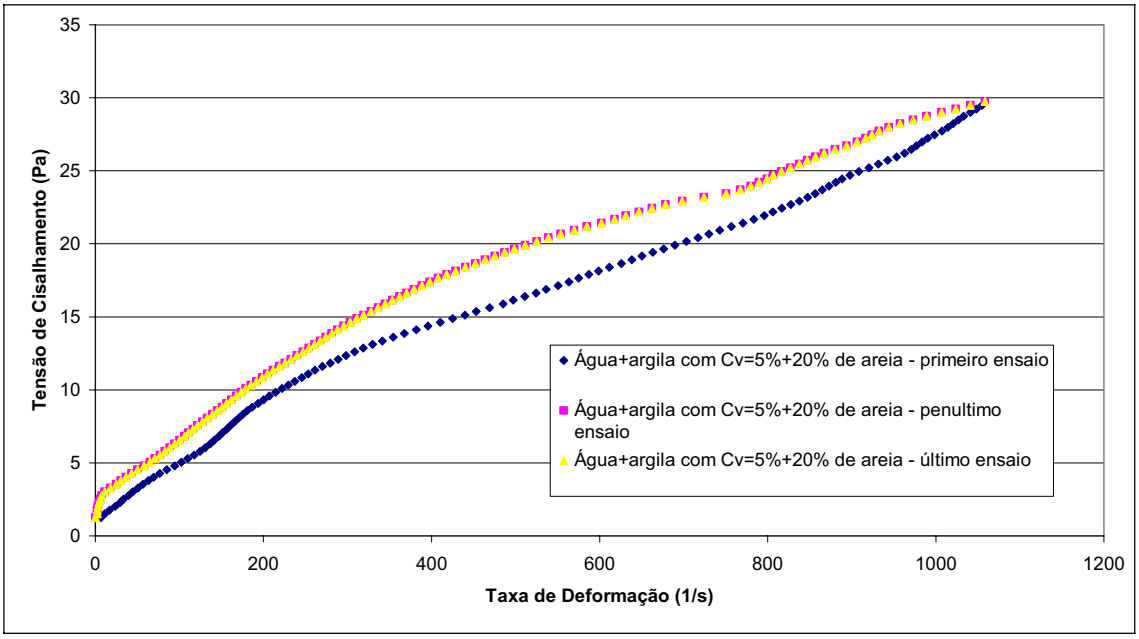


Figura 63: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 5% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

V.2.2.2.2 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 10% de argila – areia retida na peneira 100

Na série de ensaios com 10% de argila no fluido intersticial e 5% de areia no volume total do fluido, mostrada na Figura 64, pode-se notar que as três curvas apresentadas são praticamente coincidentes e com características viscoplásticas. Isso devido à baixa porcentagem de sólidos inertes na mistura, o que garante um domínio das características viscoplásticas. Com o aumento da concentração de material inerte as curvas de escoamento começam a se distanciar cada vez mais (a curva com 20% de areia - Figura 67 - é mais distanciada que a curva de 15% de areia - Figura 66 - que por sua vez é mais distanciada que a curva de 10% de areia - Figura 65).

Este efeito de afastamento das curvas de escoamento pode ser explicado da seguinte forma: o aumento da concentração de sólidos na mistura, mantendo-se o volume do material coloidal constante, gera um aumento da viscosidade global da mistura.

O aumento da viscosidade, associado com o aumento do volume de grão, causa uma maior dificuldade para que o material granular se ressuspenda e se sedimente, essa maior dificuldade na ressuspensão pode ser observada nas taxas de deformações necessárias para que cada uma das suspensões ressuspendessem seus grãos. A mistura com 5% de areia

apresenta um ponto de ressuspensão pouco acima de 400 s^{-1}, enquanto a mistura com 10% de areia apresenta a quebra da curva a 600 s^{-1}. Já a amostra com 15% de areia no volume total da mistura ressuspende o material inerte a 650 s^{-1} e, por fim a velocidade de ressuspensão da amostra com 20% de areia é a 700 s^{-1}.

Como a ressuspensão e a sedimentação estão associadas pode-se concluir que a velocidade de sedimentação das partículas também diminuía das misturas menos concentradas para as mais concentradas. A diminuição da velocidade de sedimentação também colaborou com o distanciamento entre as curvas já que, com o aumento do tempo de suspensão, os ensaios consecutivos conseguiam manter mais grãos em suspensão do que no ensaio anterior gerando um aumento na viscosidade da amostra e o afastamento das curvas.

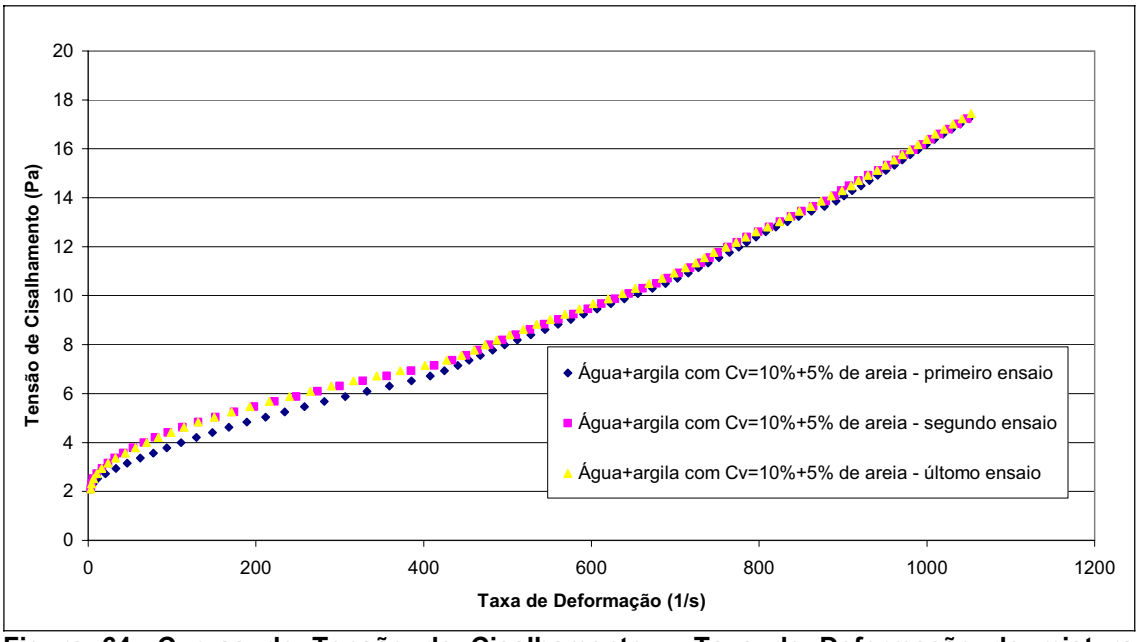


Figura 64: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

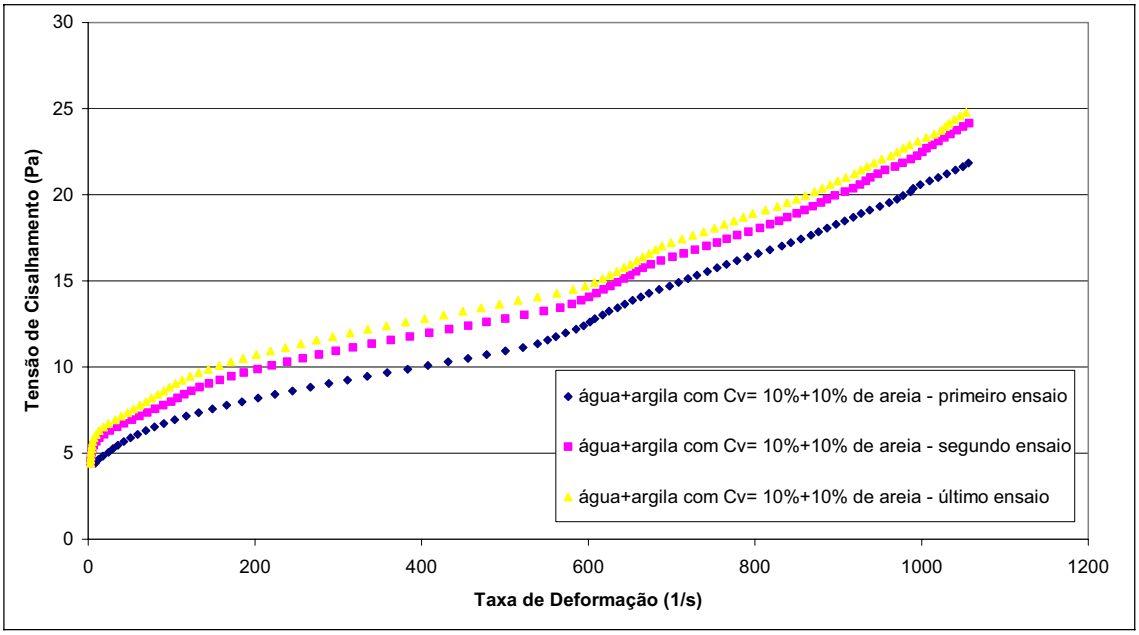


Figura 65: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

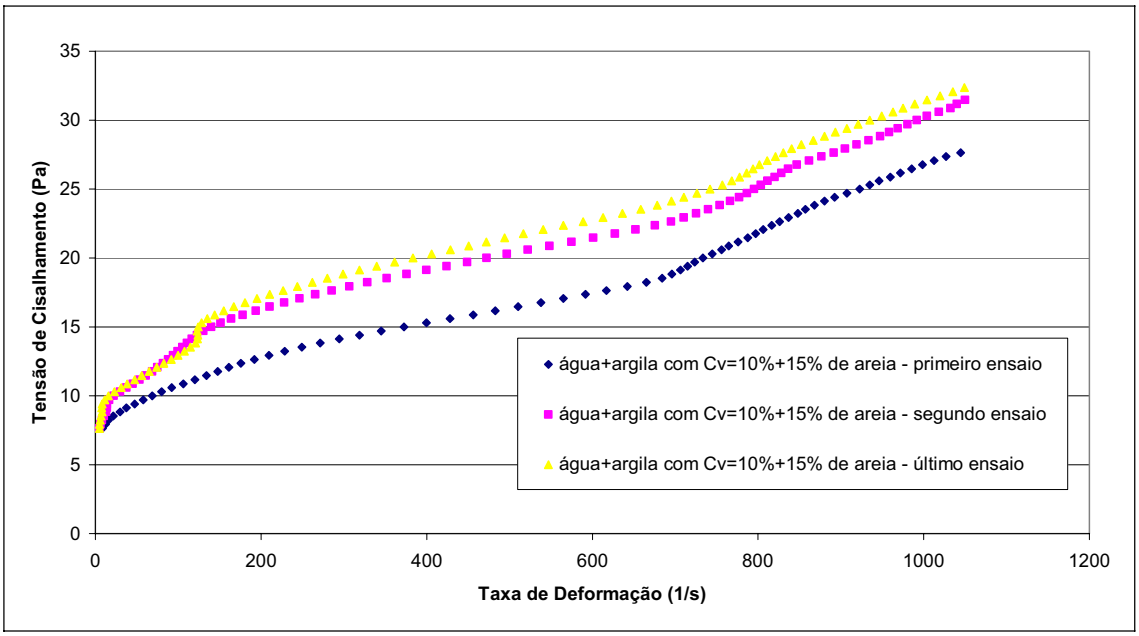


Figura 66: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

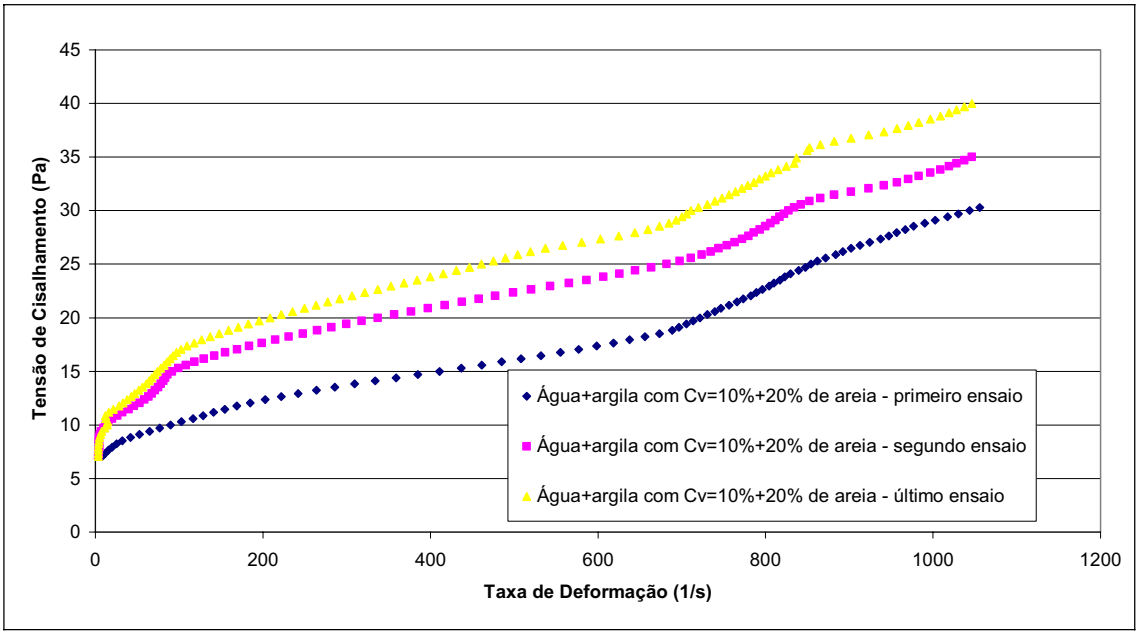


Figura 67: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 10% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

V.2.2.2.3 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 15% de argila – areia retida na peneira 100

Na série de ensaios com mistura intersticial de água+argila com C_v=15% e adição de 5, 10 e 15% de areia Volume total da mistura; Figuras 68, 69 e 70, respectivamente; pode-se notar o mesmo efeito já comentado anteriormente de que, com o aumento da fração sólida mantendo-se os finos constantes, as curvas consecutivas de cada um dos ensaios afastam-se mais umas das outras.

A diferença desta série está no ensaio de 20% de areia no volume total da mistura. Para essa série, mostrada na Figura 71, é possível notar que as curvas de escoamento dos carregamentos consecutivos aumentam sem apresentar pontos de quebra até que, no quinto carregamento, um fenômeno semelhante a uma ressuspensão ocorre. Esse fenômeno (aparentemente uma ressuspensão) são efeitos de escorregamento da amostra na parede do *"spindle"*. Após o quinto teste as curvas seguintes apresentam essa anomalia, esse efeito se apresenta em taxas de deformações crescentes até praticamente sumir no ensaio oito.

O efeito de escorregamento a partir do ensaio oito desaparece devido à baixa tensão alcançada pelo "*spindle"* utilizado (o "*spindle"* utilizado foi o CC-45 que carrega as amostras no máximo a 196 Pa). Como foi comentado

anteriormente optou-se pela utilização do "*spindle*" CC-25 apenas para as misturas intersticiais de 20% de argila.

Este efeito também foi observado na série de ensaio com 20% de argila no fluido intersticial com 20% de areia no volume total da mistura.

É pertinente lembrar que, para as amostras nas quais ocorre o processo de sedimentação, a curva de escoamento segue a teoria de Bagnold (1954), adaptada por Lledo (2003) para fluidos hiperconcentrados. Assim, para baixas taxas de deformação, pode-se observar a região macro-viscosa onde a curva de escoamento segue o padrão viscoplástico do modelo de Herschel-Bulkley.

Da mesma forma, para altas taxas de deformação, ocorre o efeito de pseudo-dilatância característico da região inercial de grãos.

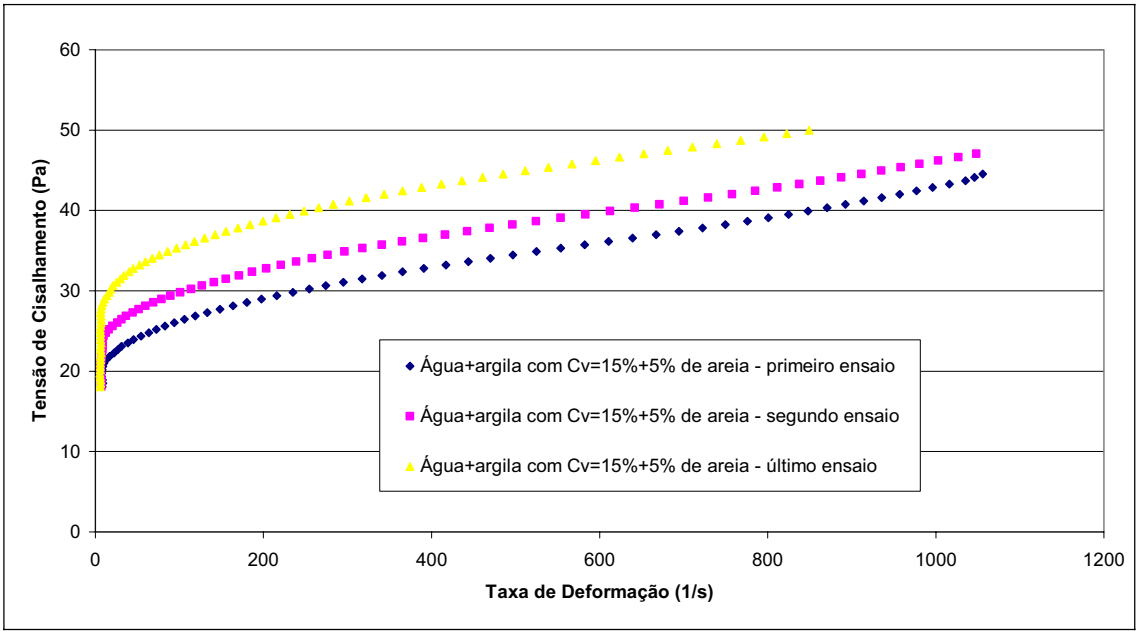


Figura 68: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

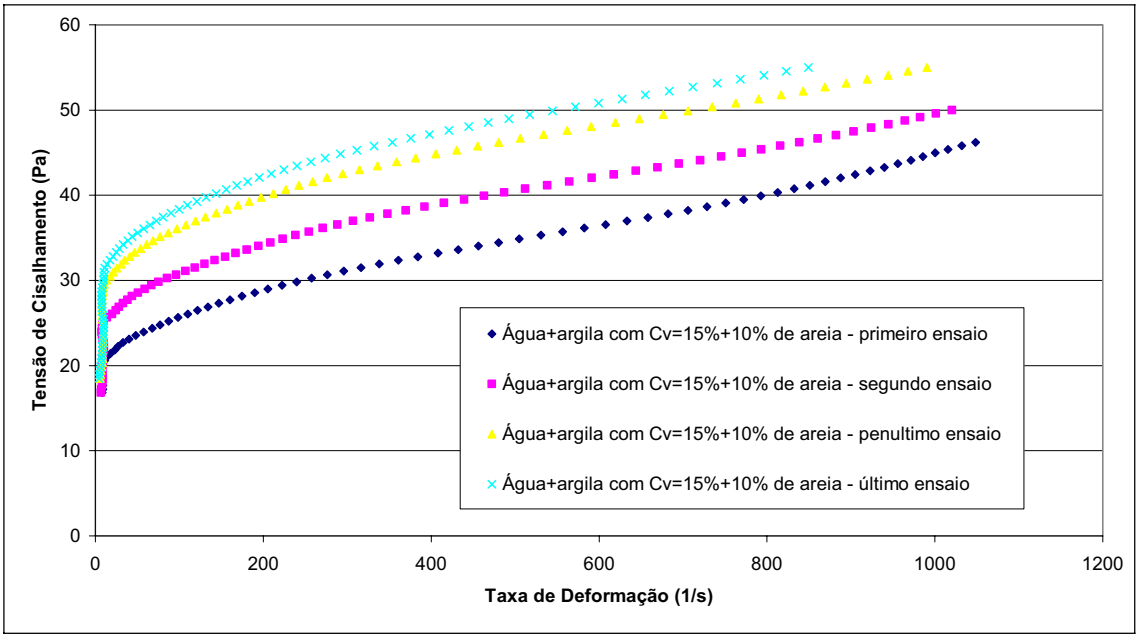


Figura 69: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

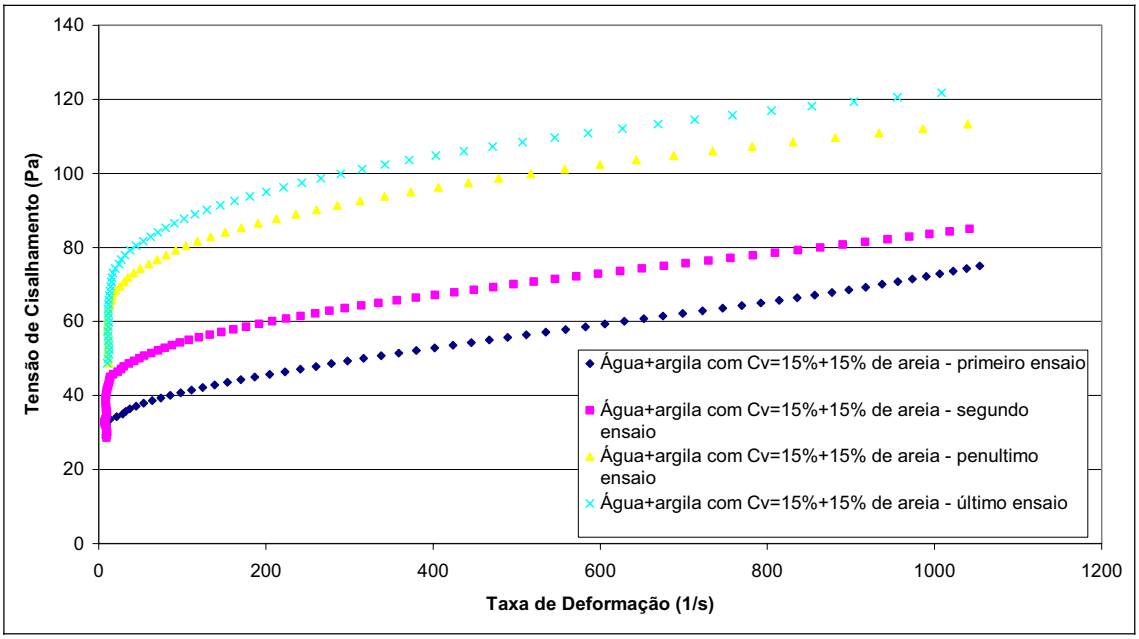


Figura 70: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

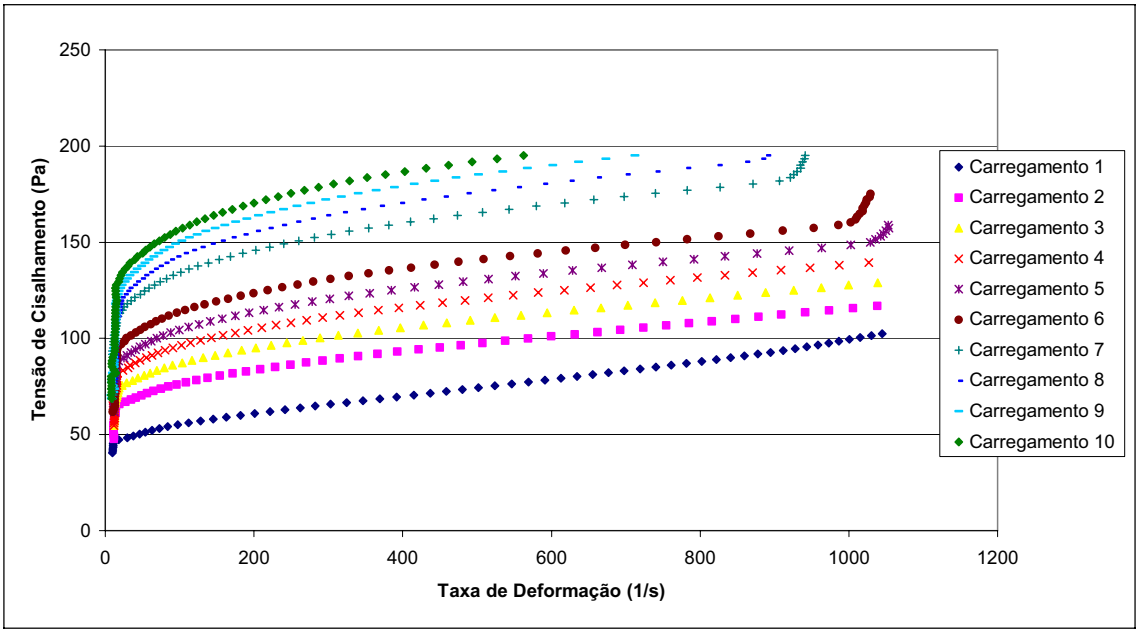


Figura 71: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 15% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

V.2.2.2.4 - Amostras preparadas com mistura intersticial de 20% de argila – areia retida na peneira 100

Diferentemente das séries apresentadas no item anterior as amostras com 20% de argila no fluido intersticial possuem pontos de quebra nos primeiros ensaios de cada série, esses pontos de quebra somem após o primeiro ensaios nas amostras com 5, 10 e 15% de areia no volume total da mistura (Figuras 72, 73 e 74). Apesar de utilizar o "*spindle*" CC-25 (que pode ser carregado a tensões muito maiores que o CC-45 – aproximadamente 1196 Pa), as tensões máximas alcançadas ainda não eram suficientes para continuar a carregar o ensaio e gerar a completa suspensão do material inerte.

Observando as curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação da amostra com fluido intersticial de 20% de argila e 20% de areia (Figura 75), pode observar o mesmo fenômeno ocorrido com a amostra de 15% de fluido intersticial com 20% de areia nos sólidos totais. Apenas a primeira curva indica uma ressuspensão do material granular que, após o primeiro ensaio não torna a se sedimentar. A continuação do aumento da viscosidade dessa amostra com a realização dos testes consecutivos pode ser explicado pela soma de 2 efeitos. O primeiro efeito é um aumento da viscosidade do fluido intersticial causada pelo aumento da saturação dos grãos de argila (o aumento da saturação das partículas coloidais deve ser provocado pela

agitação da amostra dentro do *"spindle"* durante o ensaio). Além disso, o efeito de deslizamento de parede, já comentado no item anterior, também pode ser observado na Figura 75.

O segundo efeito seria uma pequena ressuspensão dos grãos inertes (imperceptível durante a realização do teste). Esse segundo efeito ocorre da seguinte forma: com o fim do teste reométrico inicial uma grande quantidade de grãos foi ressuspensa, entretanto alguns grãos ainda devem permanecer no fundo da jaqueta. Com a realização dos outros testes uma parte dessa pequena porção de inertes que ficou no fundo da amostra deve migrar lentamente para partes superiores da jaqueta e não tornam a se sedimentar aumentando a viscosidade da amostra nos ensaios subseqüentes.

Esse mesmo raciocínio deve ser válido para as amostras que não apresentam sedimentação. Já para as amostras que apresentam sedimentação apenas o aumento de viscosidade devido a saturação dos colóides deve atuar. Um fato que reforça essa hipótese é que, nas amostras onde ocorrem sedimentação, as amostras com maiores concentrações de argila possuem um maior ganho de viscosidade durante os testes consecutivos se comparadas com as outras amostras de baixas concentrações de argila.

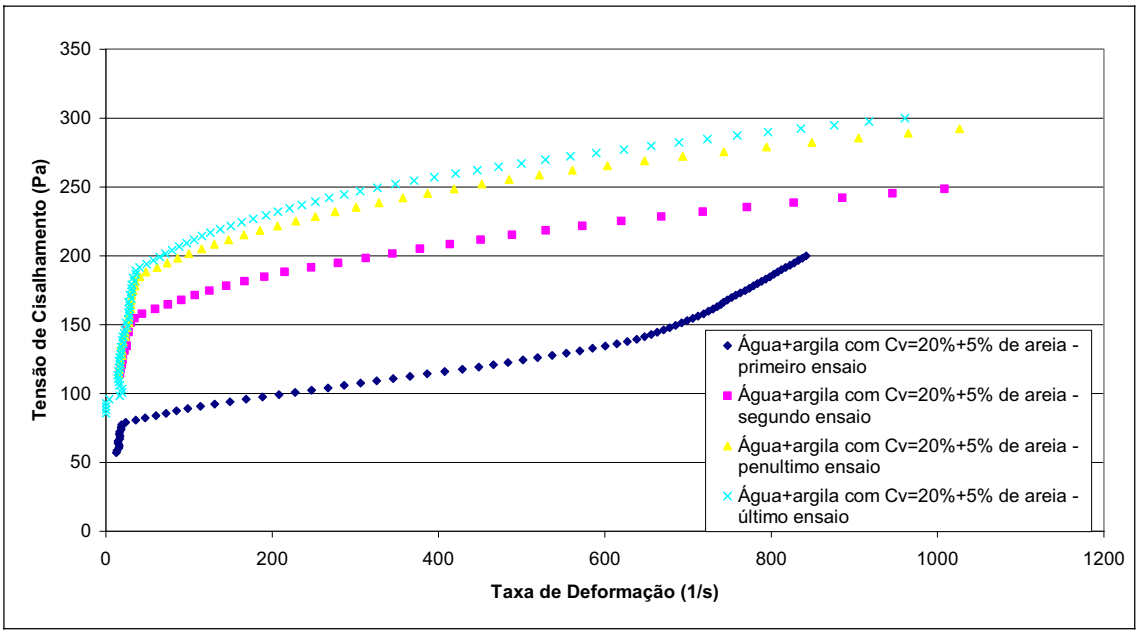


Figura 72: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 5% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

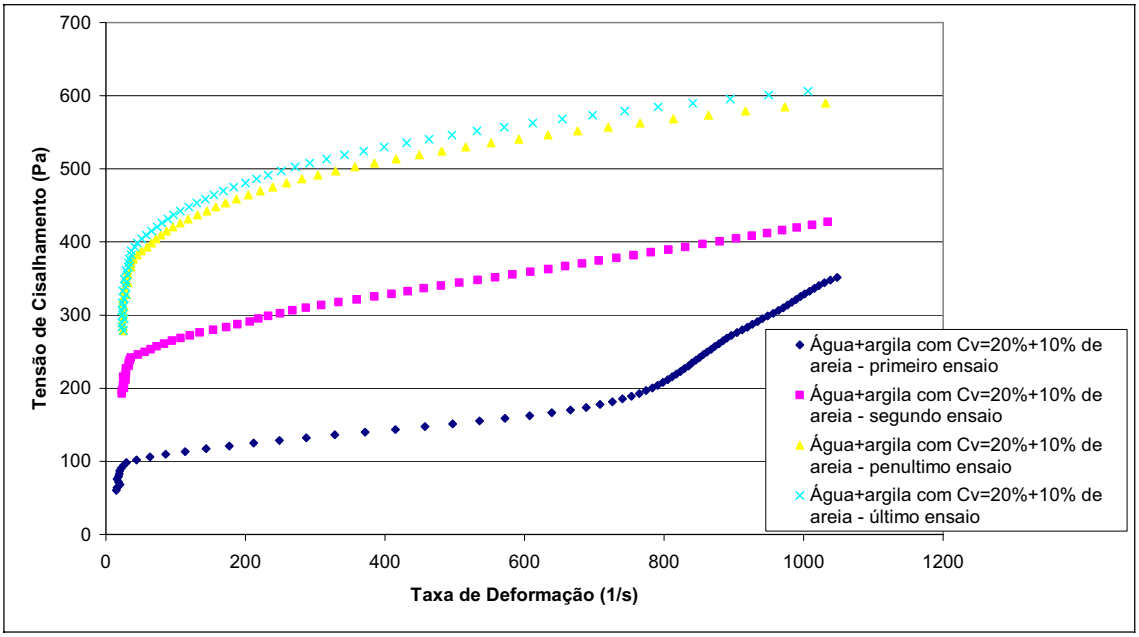


Figura 73: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 10% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

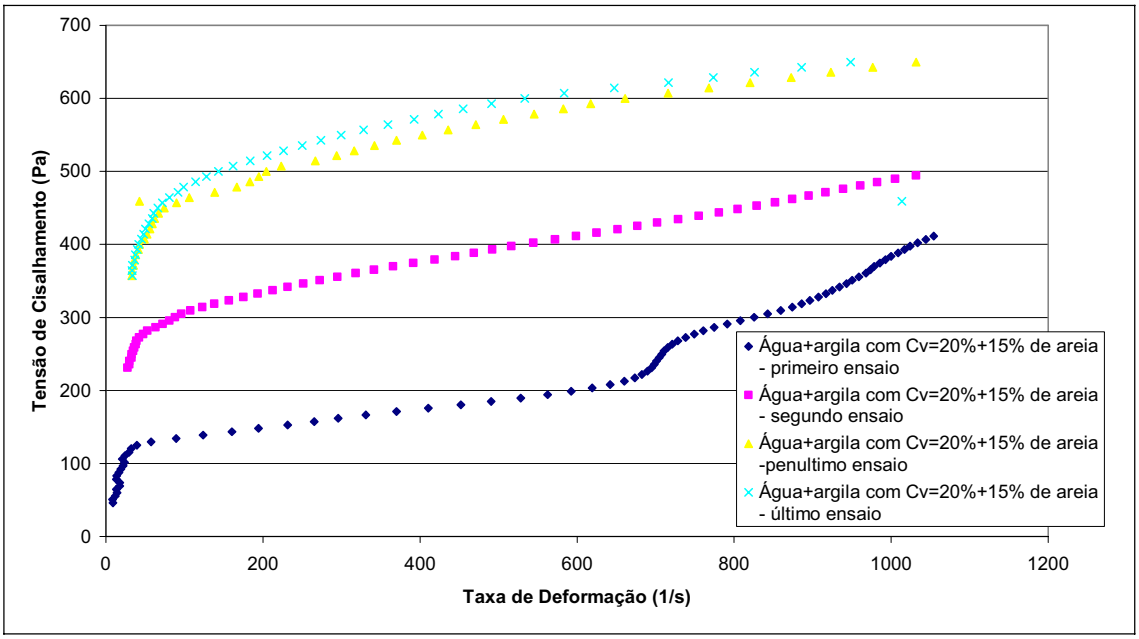


Figura 74: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 15% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

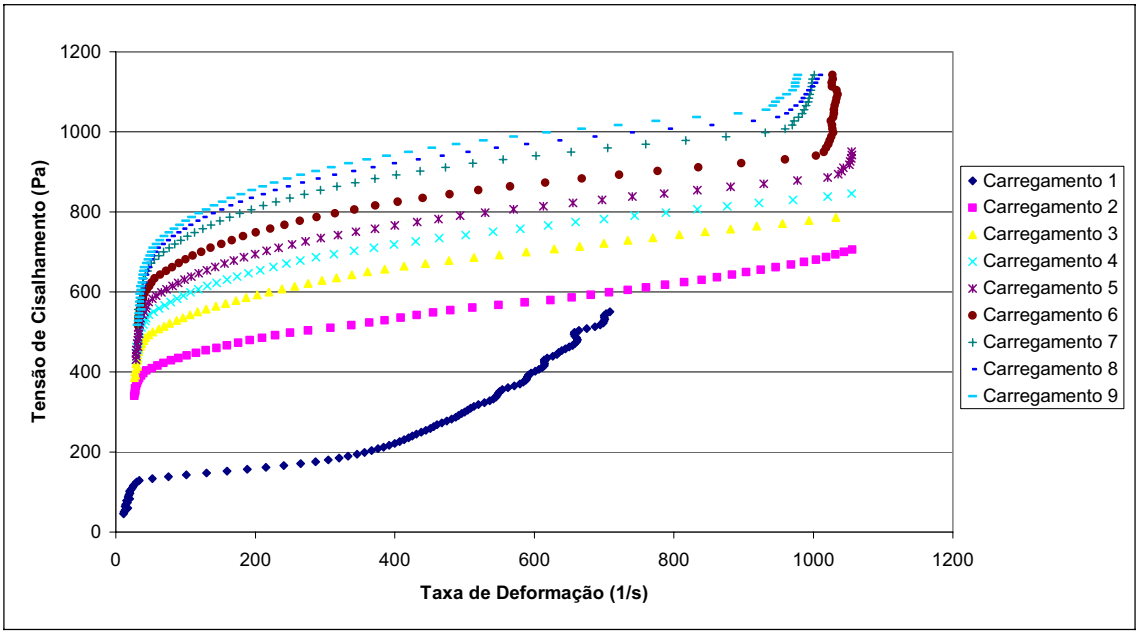


Figura 75: Curvas de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Deformação de mistura intersticial de 20% de argila com 20% de areia no volume total da mistura – ensaio com areia retida na peneira 100

V.2.2.2.5 - Ensaios de pistas de carregamento constante – areia retida na peneira 100

Para uma melhor visualização do efeito da fração inerte dos sólidos sobre a viscosidade, foram plotadas as curvas de viscosidade em função do tempo para as mistura de 5, 10 e 15% de concentração em volume de argila como mistura intersticial, respectivamente Figuras 76, 77 e 78. Nestes ensaios também foram realizados ensaios de carregamento consecutivos para se obter o efeito de máxima ressuspensão em todas as amostras, dessa forma não foi possível realizar ensaios com as amostras de 20% de argila nas misturas intersticiais, pois era necessário um outro "*spindle"* (CC-14) que não obedecia as especificações do fabricante quanto ao "*gap*".

Em todas as curvas pode-se notar que com o início do ensaio a viscosidade das amostras cai bruscamente (ocorre a quebra da tensão crítica inicial), após o início do ensaio, com o aumento do tempo, ocorre também o aumento da viscosidade das amostras devido a ressuspensão do material.

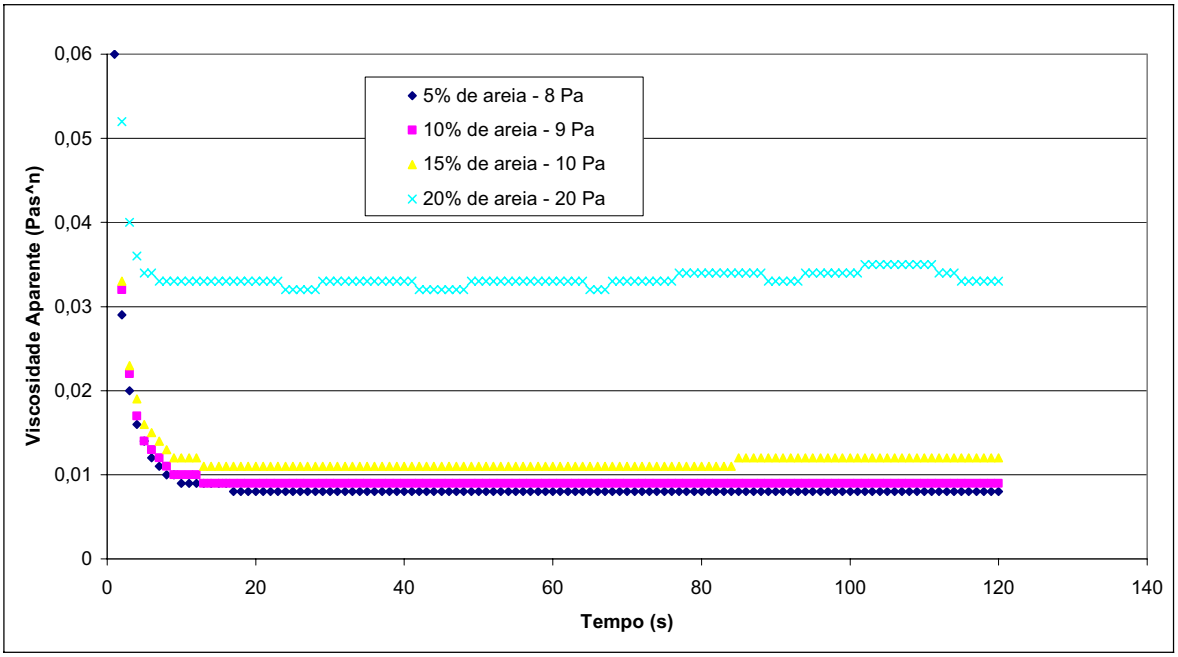


Figura 76: Curvas de Viscosidade x Tempo de mistura intersticial de 5% de argila e pista constante de tensão aplicada a cada amostra – ensaio com areia retida na peneira 100

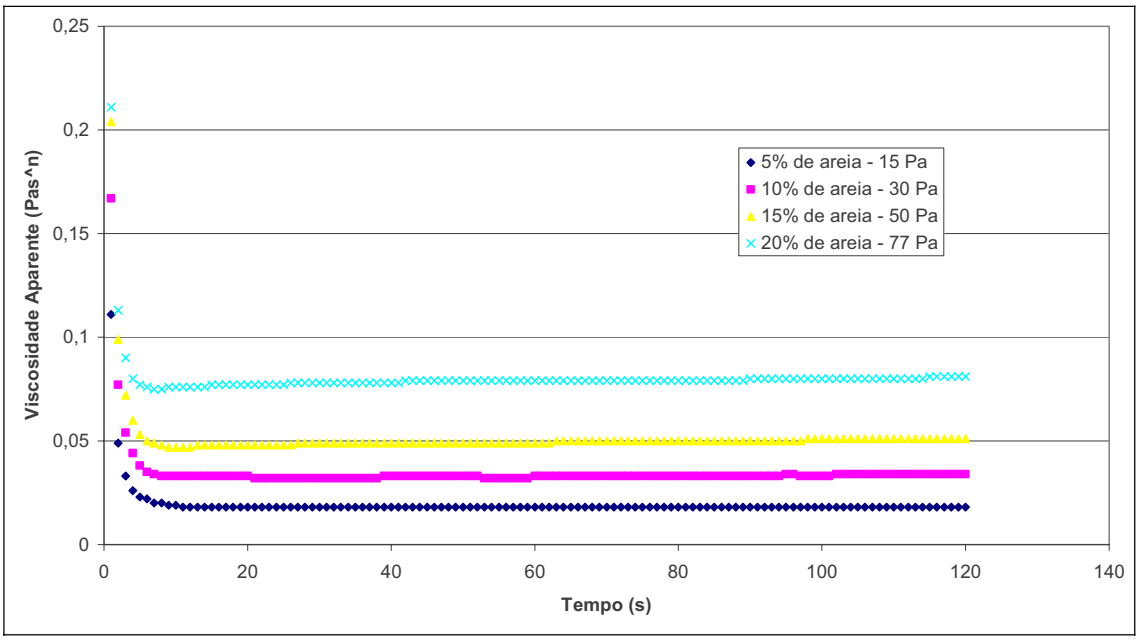


Figura 77: Curvas de Viscosidade x Tempo de mistura intersticial de 10% de argila e pista constante de tensão aplicada a cada amostra – ensaio com areia retida na peneira 100

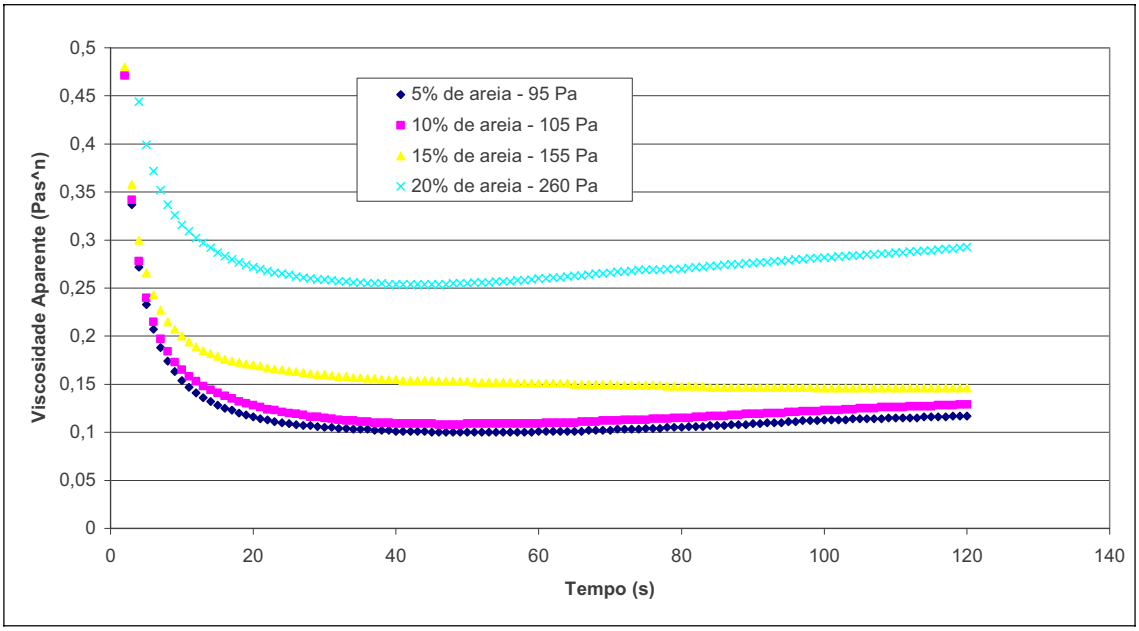


Figura 78: Curvas de Viscosidade x Tempo de mistura intersticial de 15% de argila e pista constante de tensão aplicada a cada amostra – ensaio com areia retida na peneira 100

Para cada um dos ensaios de pista constante, a tensão máxima aplicada depende da porcentagem de sólidos totais das misturas. Assim, foram plotadas (Figura 79) três curvas com a concentração em volume de argila nas misturas intersticiais constantes, variando a porcentagem de grãos na mistura e a tensão máxima aplicada.

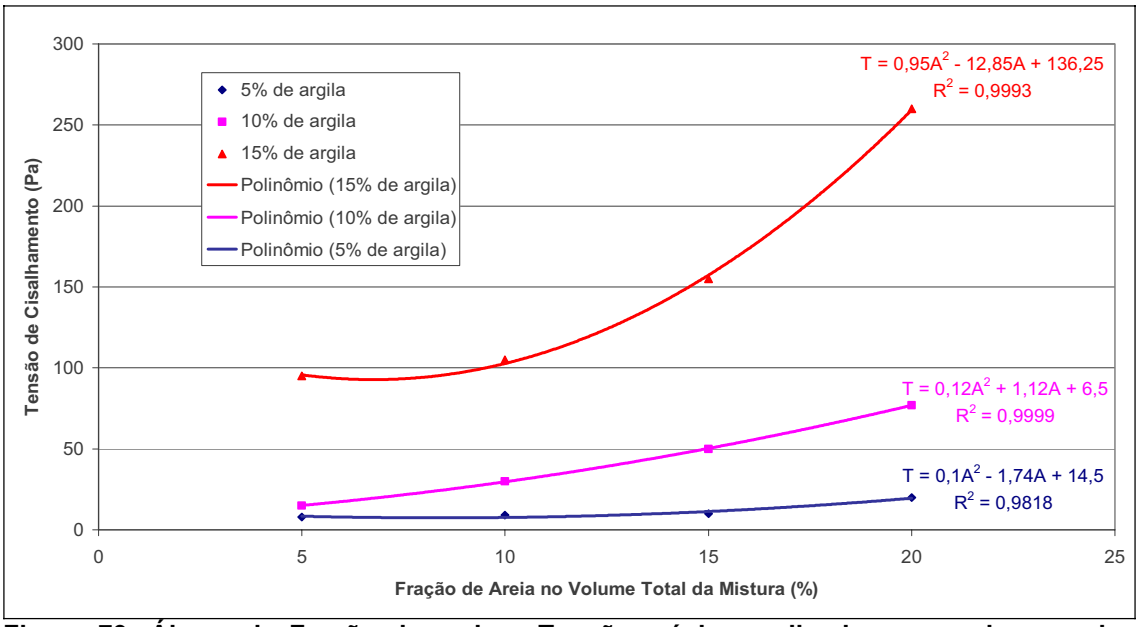


Figura 79: Ábaco de Fração de areia x Tensão máxima aplicada para cada uma das amostras de água+argila – ensaio com areia retida na peneira 100

V.3 - Parte 3

Neste item serão descritos os ensaios realizados com misturas de água+argila+areia fina. Foram realizados ensaios reométricos para determinar a influência da granulometria dos inertes (areia fina) no comportamento de mistura homogêneas (que devem seguir o modelo reológico de Hersclhel-Bulkley).

Foram realizados ensaios com varias composições de mistura água+argila+areia fina. Devido ao problema de limitação geométrica do reômetro (o diâmetro dos sólidos inertes devem ser da ordem de 1/10 do diâmetro do "*gap*" do aparelho), as areias utilizadas foram previamente peneiradas e, em seguida, as frações de sólidos inertes foram compostas.

Utilizaram-se 4 tipos de areias como inertes que compunham as misturas, a saber: areia retida na peneira 100 e que passa na peneira 60 (diâmetro médio dos grãos de 0,150 mm); areia retida na peneira 140 e que passa na peneira 100 (diâmetro médio dos grãos de 0,105 mm) e areia retida na peneira 200 e que passa na peneira 140 (diâmetro médio dos grãos de 0,075 mm) – A numeração das peneiras mostradas anteriormente segue a norma ABNT. Também foram realizados ensaios com uma composição de areia com os 3 diâmetros descritos anteriormente na mesma proporção.

Foram realizados ensaios com 2 tipos de amostras: amostras com a matriz intersticial constante, com concentração em volume de 15% de água+argila e com as seguintes adições de areia: 5, 10, 15 e 20% (essas proporções de areia foram repetidas para todos os 4 tipos de granulometria descritos anteriormente). A quantidade total de sólidos em cada uma das misturas pode ser vista na Tabela 12.

Tabela 12: Concentrações em volume de sólidos totais de cada mistura e fração de inertes nos sólidos totais

Composição	Concentração em volume de sólidos totais (%)	Fração de areia nos sólidos (%)
15% de argila e 5% de areia	19,25	25,97
15% de argila e 10% de areia	23,50	43,48
15% de argila e 15% de areia	27,75	54,05
15% de argila e 20% de areia	32,00	62,50

NOTA: Em ensaios reométricos realizados anteriormente por este grupo de pesquisa (Lledo, 2003), concentrações em volume apenas de argila acima de 25% não puderam ser ensaiadas devido a grande tensão crítica de mistura acima desse valor. Esse fato comprova que a adição de areia (inerte) não aumenta o efeito coloidal da mistura, apenas atua dificultando o escoamento e, por conseguinte, aumentando a viscosidade da mistura.

Além disso, foram preparadas amostras com a quantidade de sólidos totais constantes, variando-se a porcentagem de areia, para cada uma das granulometrias descritas anteriormente.

A quantidade de sólidos totais de cada amostra era constante de 20% e desses sólidos totais variou-se a porcentagem de areia de 0, 10, 25 e 35%. A Tabela 13 descreve os dados destas misturas.

Tabela 13: Concentrações em volume das misturas intersticiais (água+argila) e fração de inertes nos sólidos totais

Concentração em volume de sólidos totais (%)	Concentração em volume da mistura intersticial (%)	Fração de areia nos sólidos (%)
20	20,00	0
20	18,37	10
20	15,79	25
20	13,98	35

V.3.1 - Ensaios com misturas de água+argila+areia fina com mistura intersticial constante de C_v=15%

Os resultados obtidos nos ensaios reométricos das amostras com mistura intersticial de água+argila de 15% e adições de 5, 10, 15 e 20% de areia no volume total de mistura podem ser vistos nas Figuras 80, 81, 82 e 83. Os valores *N*, determinados pela Equação 34, para as misturas ensaiadas nesse item são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14: Valores de *N* para diversos tamanhos de grãos

Mistura intersticial (%)	τ_c (Pa)	ρ_f (kg/m^3)	ρ' (kg/m^3)	Diâmetro da partícula (m)	N
15	16,11	1243	1427	0,00015	0,087 < 1
				0,000105	0,061 < 1
				0,000075	0,043 < 1

Em nenhum caso o valor de *N* foi superior a 1.

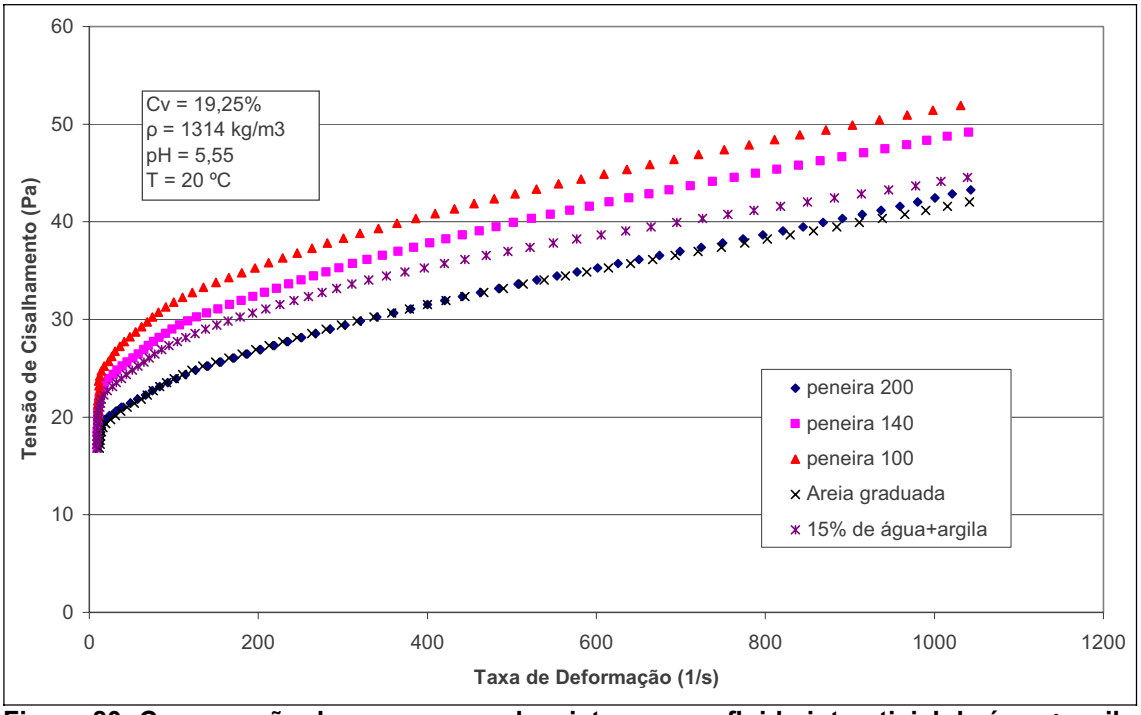


Figura 80: Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com C_v =15% e adição de 5% de areia de várias granulometrias

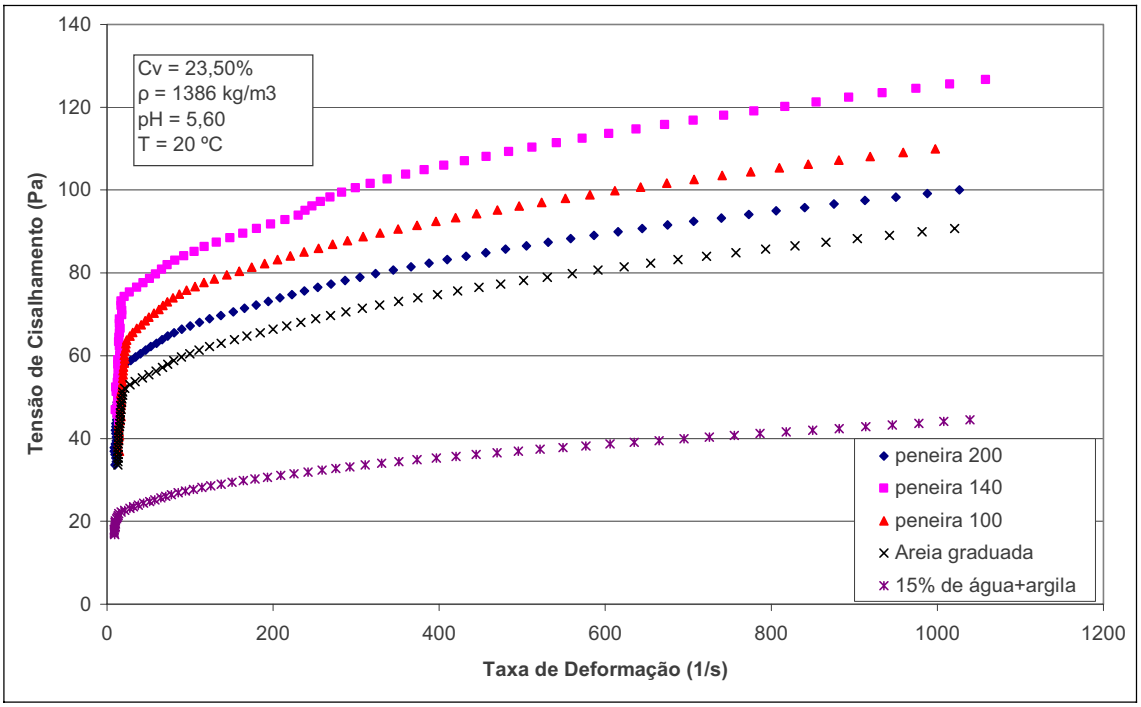


Figura 81: Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com C_v =15% e adição de 10% de areia de várias granulometrias

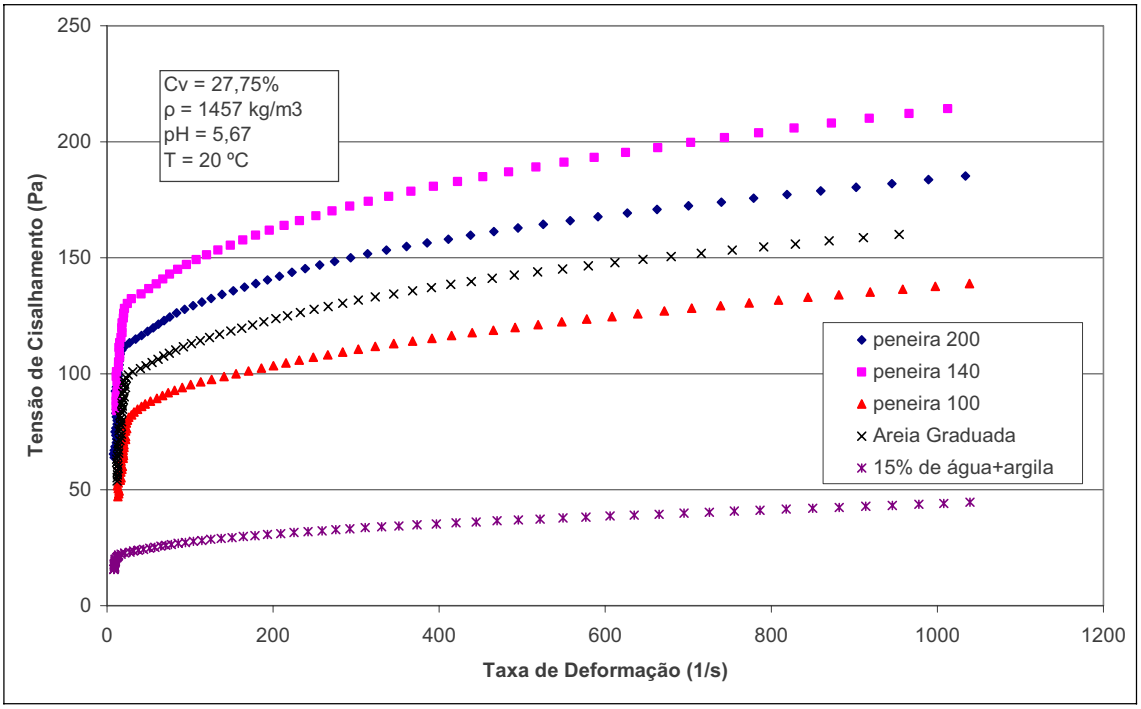


Figura 82: Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com C_v =15% e adição de 15% de areia de várias granulometrias

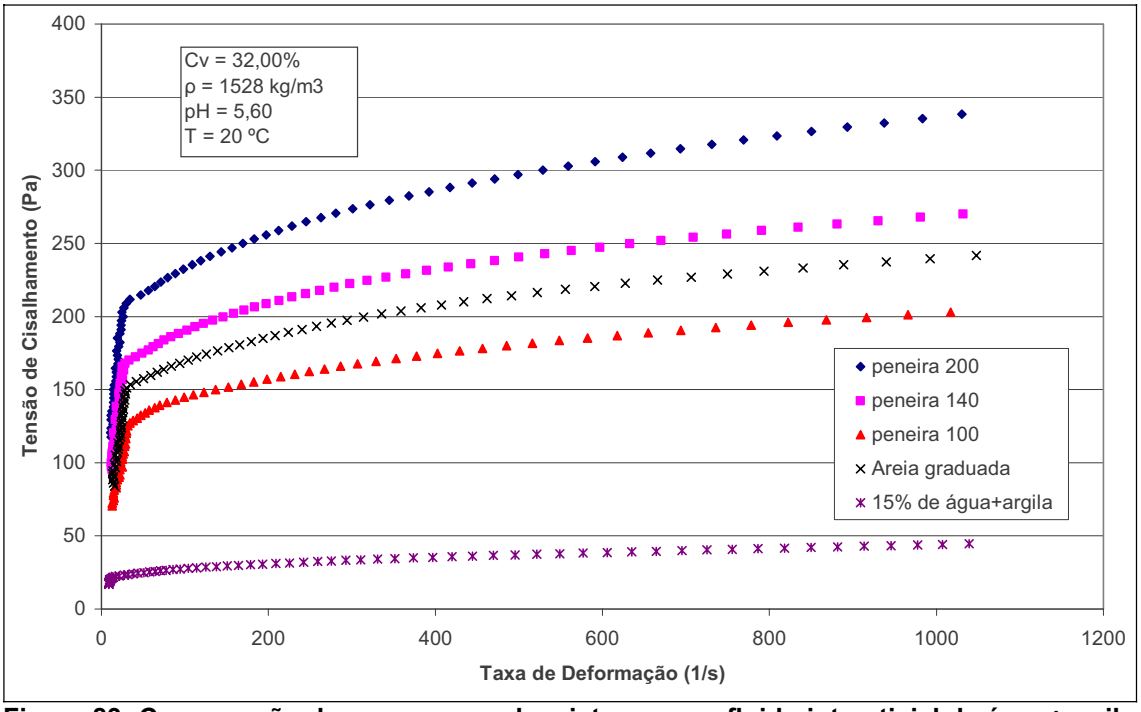


Figura 83: Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com C_v =15% e adição de 20% de areia de várias granulometrias

Ajustando cada uma das curvas apresentadas anteriormente ao modelo de Herschel-Bulkley $\left(\tau = \tau_c + k\dot{\gamma}^n\right)$ foram obtidos os parâmetros reológicos apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Ajuste dos parâmetros reológicos ao modelo de Herschel-Bulkley

Tipo de areia	Adição de areia	τ_c	k	n
Peneira 100	5%	19,74	1,60	0,43
	10%	42,38	7,97	0,31
	15%	61,06	6,40	0,36
	20%	80,00	17,65	0,28
Peneira 140	5%	17,15	1,61	0,43
	10%	60,97	3,31	0,43
	15%	99,77	8,67	0,37
	20%	111,30	20,12	0,30
Peneira 200	5%	16,72	0,49	0,571
	10%	47,50	2,74	0,43
	15%	77,31	12,12	0,31
	20%	131,18	25,23	0,30
Areia Graduada	5%	16,48	0,62	0,53
	10%	42,49	2,48	0,43
	15%	76,25	6,69	0,37
	20%	105,88	14,63	0,32
Sem areia	-	17,00	1,43	0,42

Observando as figuras pode-se notar que a influência da granulometria no comportamento das misturas depende da fração de areia adicionada. Na Figura 80 (amostra com 5% de areia no volume total da mistura) a maior tensão final alcançada corresponde a areia retida na peneira 100, seguida da peneira 140, com a peneira 200 sobreposta a areia graduada.

Já na Figura 83 (amostra com 20% de areia no volume total da mistura) a maior tensão alcançada corresponde a areia retida na peneira 200, seguida da peneira 140, peneira 100, sendo que a amostra composta de areia graduada está entre as amostras de diâmetros correspondentes as peneiras 140 e 200.

Como pode ser notado ocorre uma inversão da influência da granulometria para os 2 casos citados anteriormente (na adição de 5% de areia o maior diâmetro causa o maior acréscimo de tensão na mistura, entretanto na adição de 20% de areia o maior acréscimo é provocado pela areia de menor diâmetro). Analisando ainda as Figuras 81 e 82, pode-se notar uma inversão da influência da granulometria: Na Figura 81 (amostra com 10% de areia) a maior tensão é provocada pela areia retida na peneira 140, seguida da peneira 100 e peneira 200, a areia graduada possui a menor tensão nesse caso. No caso subseqüente (Figura 82 – mistura com15% de areia) a maior tensão é provocada ainda pela areia retida na peneira 140, porém a próxima maior tensão é gerada pela amostra preparada com a areia retida na peneira 200.

Em todos os casos as amostras preparadas com a areia graduada mantiveram-se, aproximadamente, na mesma posição em relação às outras curvas. Esse fato indica que essa amostra apresenta propriedades médias (o que é coerente, pois possuía as mesmas frações de cada uma das granulometrias).

Este efeito de inversão de influência da granulometria pode ser justificado pelo seguinte fato: apesar dos volumes de areia serem os mesmos, as superfícies específicas de uma dada granulometria variaram.

É sabido da mecânica dos solos que entre 2 amostras com os mesmos volumes de sólidos, aquela que apresentar menor diâmetro médio de seus grãos possuirá maior superfície específica (a superfície específica de uma amostra granular corresponde a soma das áreas de cada um dos grãos, esse valor pode ser determinado a partir de testes de percolação).

A partir desta consideração ter-se-ia a seguinte explicação: na amostra com adição de 5% de areia a quantidade de sólidos inertes inserido na mistura é muito baixo, dessa forma, a influência da área específica dos grãos não é significativa no comportamento global da mistura. Nesse caso, o que seria significativo é o diâmetro dos grãos.

Os grãos de diâmetros maiores poderiam criar mais dificuldades para o escoamento do fluido intersticial que os grãos de diâmetros menores, fazendo com que fosse necessária uma maior tensão, no caso dos grãos maiores, para imprimir uma mesma taxa de deformação que as amostras compostas de grãos menores.

Já para o caso de adição de 20% de areia no volume total da mistura, o volume de sólidos inertes seria muito alto, assim, o efeito da área superficial dos grãos inertes seria muito mais significativo que o efeito da resistência do diâmetro do grão no escoamento.

Devido à grande área superficial das partículas de diâmetros menores, parte da água que compõe a mistura água+argila (fluido intersticial) deve ser disponibilizada para “molhar” as partículas inertes, dessa forma, a mistura intersticial se tornaria mais concentrada aumentando a dificuldade de escoamento para misturas compostas de grãos de diâmetros menores.

Além disso, durante os ensaios foi possível ser constatado visualmente que as amostras de 15% de fluido intersticial com 20% de areia retida na

peneira 200 eram mais viscosas que as amostras compostas com 20% de areia retida na peneira 100. Foram também realizados ensaios repetitivos (foram feitas e ensaiadas novas amostras com as mesmas composições para garantir os resultados não são enganosos ou precipitados).

As amostras correspondentes às misturas com fluido intersticial de água+argila com C_v=15% e adições de 10 e 15% de areia no volume intersticial seriam casos intermediários, nos quais os 2 efeitos (área superficial e diâmetro dos grãos) influenciariam na curva de escoamento.

Nas Figura 84, 85, 86 e 87 são apresentas as variações de tensões críticas em função da granulometria para cada uma das adições de areia, note que em todos os casos (menos na adição de 5% de areia) ocorreu um aumento da tensão crítica se comparada com amostra de água+argila sem adição de areia. Para o caso de adição de 5% de areia a tensão crítica é maior, para a areia retida na peneira 200 e areia graduada, porém a tensão final alcançada é praticamente a mesma para os 3 casos (areia retida na peneira 200, areia graduada e amostra sem areia), isso mostra que a adição de areia diminuiu o caráter plástico da amostra nesses casos.

Para a determinação do erro médio foi utilizada a Equação 66, sendo o erro do aparelho de ±3% e o erro experimental de ±6,29. Assim, o erro total foi de ±6,97%.

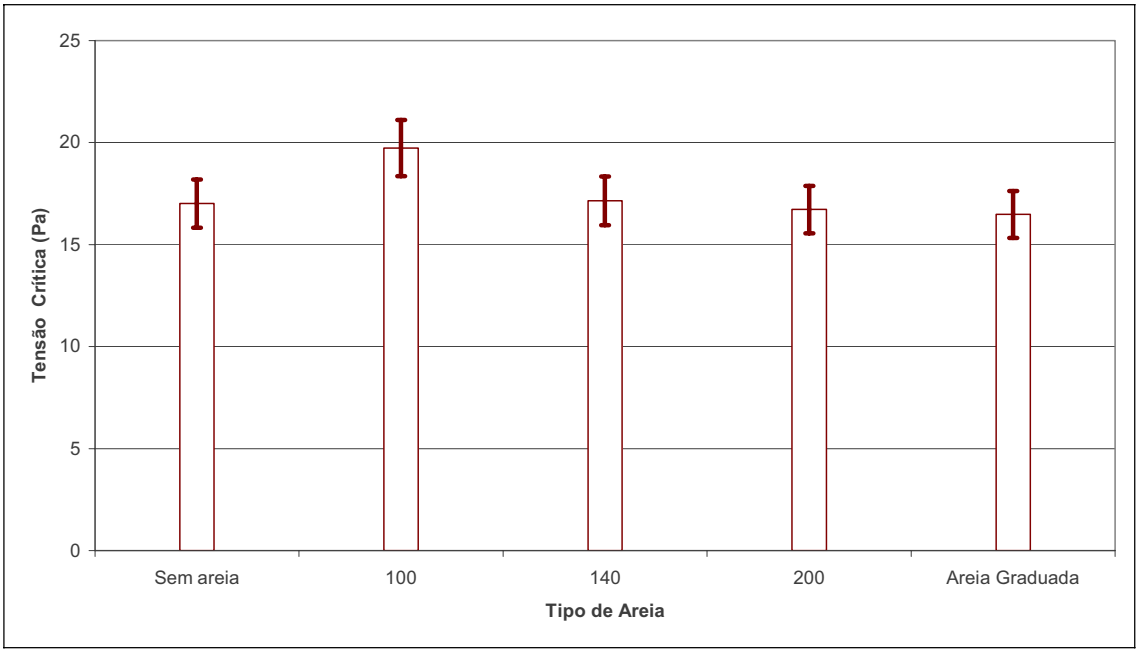


Figura 84: Variação da tensão crítica em função da granulometria, adição de 5% de areia com barra de erros de ± 6,97%

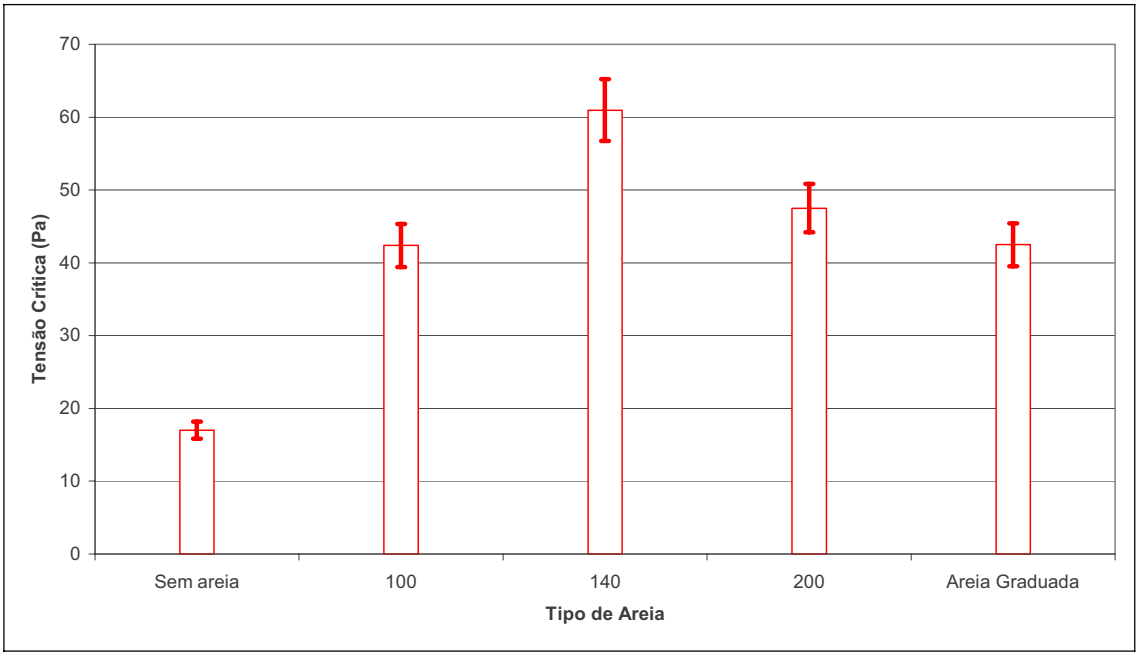


Figura 85: Variação da tensão crítica em função da granulometria, adição de 10% de areia com barra de erros de ± 6,97%

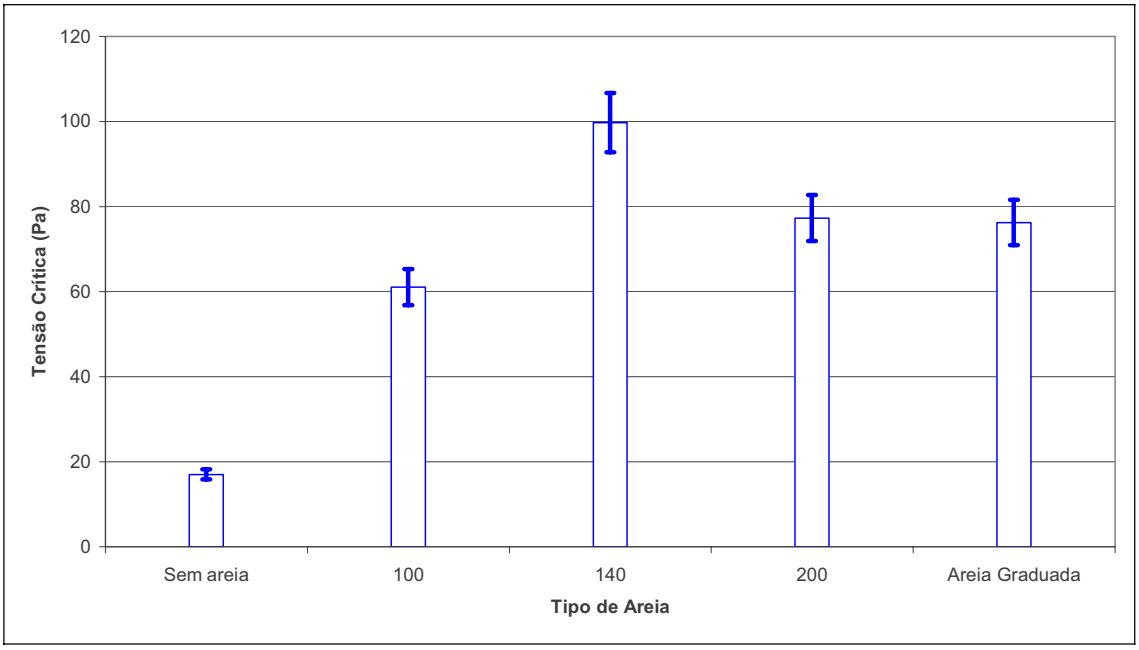


Figura 86: Variação da tensão crítica em função da granulometria, adição de 15% de areia com barra de erros de ± 6,97%

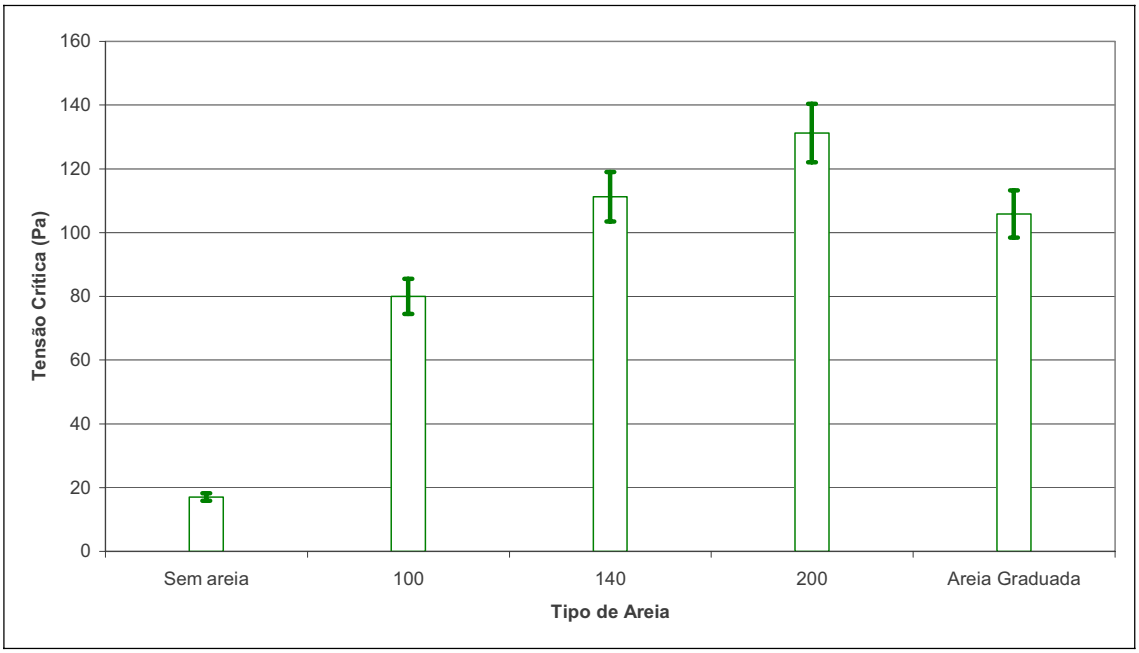


Figura 87: Variação da tensão crítica em função da granulometria, adição de 20% de areia com barra de erros de ± 6,97%

Ressalta-se que nas pesquisas bibliográficas realizadas, não foram encontradas, em nenhum caso, equações de variação de tensão crítica em função da adição de grãos que levasse em conta o efeito da área superficial dos grãos. As equações encontradas consideravam apenas a concentração de inertes e o diâmetro dos grãos.

V.3.2 - Ensaios com misturas de água+argila+areia fina com concentração de sólidos totais constante de 20%

Em uma primeira análise, os dados obtidos dos ensaios com concentração de sólidos totais constantes (20%) na mistura podem ser vistos nas Figuras 88, 89 e 90. Nesta primeira etapa de análise dos dados foram comparados os ensaios com adição de areia para uma mesma granulometria.

Para garantir que não houvesse a sedimentação do material inerte durante os testes reométricos, foram calculados os valores de *N* (segundo a Equação 34). As misturas foram preparadas com areia retida na peneira 100, areia retida na peneira 200 e areia graduada. Os valores de *N* e os dados utilizados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Dados e valores de N para as misturas com concentração total de sólidos constante de 20%

Mistura intersticial (%)	τ_c (Pa)	ρ_f (kg/m^3)	ρ' (kg/m^3)	Diâmetro da partícula (m)	N
18,37	86,79	1297,59	1372,41	0,00015	0,015 < 1
15,79	26,78	1255,80	1414,20		0,052 < 1
13,98	6,75	1226,48	1443,52		0,210 < 1
18,37	86,79	1297,59	1372,41	0,000075	0,008 < 1
15,79	26,78	1255,80	1414,20		0,026 < 1
13,98	6,75	1226,48	1443,52		0,105 < 1

Pode-se notar que todos os valores de *N* são menores que 1, indicando a não sedimentação das partículas.

Os dados referentes ao ajuste das curvas, com concentração de sólidos totais de 20% no volume total da mistura, ao modelo reológico de Herschel-Bulkley podem ser vistos na Tabela 17.

Tabela 17: Ajuste dos parâmetros reológicos ao modelo de Herschel-Bulkley

Tipo de Areia	Adição de areia nos sólidos totais (%)	Mistura intersticial C_v (%)	τ_c (Pa)	k (Pas^n)	n
peneira 200	0	20,00	148,50	11,42	0,37
	10%	18,37	87,65	8,03	0,36
	25%	15,79	38,34	2,33	0,42
	35%	13,98	22,63	1,39	0,45
peneira 100	0	20,00	148,50	11,42	0,37
	10%	18,37	76,39	9,53	0,33
	25%	15,79	23,47	3,11	0,36
	35%	13,98	18,52	1,88	0,40
graduada	0	20,00	148,5	11,42	0,37
	10%	18,37	99,69	6,52	0,39
	25%	15,79	38,53	2,82	0,40
	35%	13,98	23,90	1,88	0,41

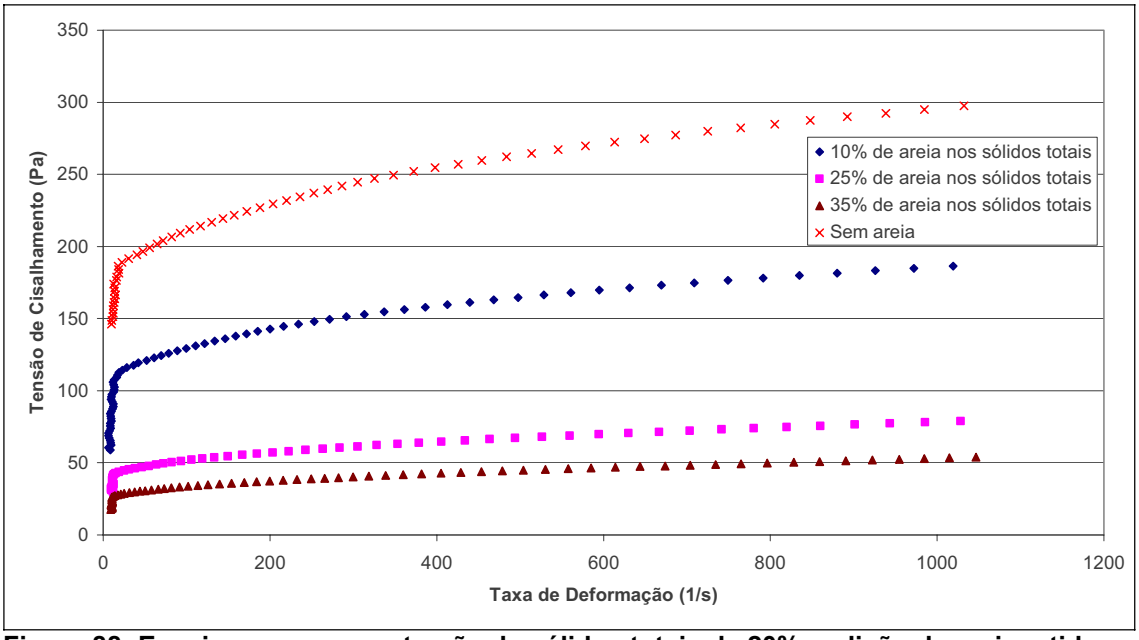


Figura 88: Ensaios com concentração de sólidos totais de 20% - adição de areia retida na peneira 200

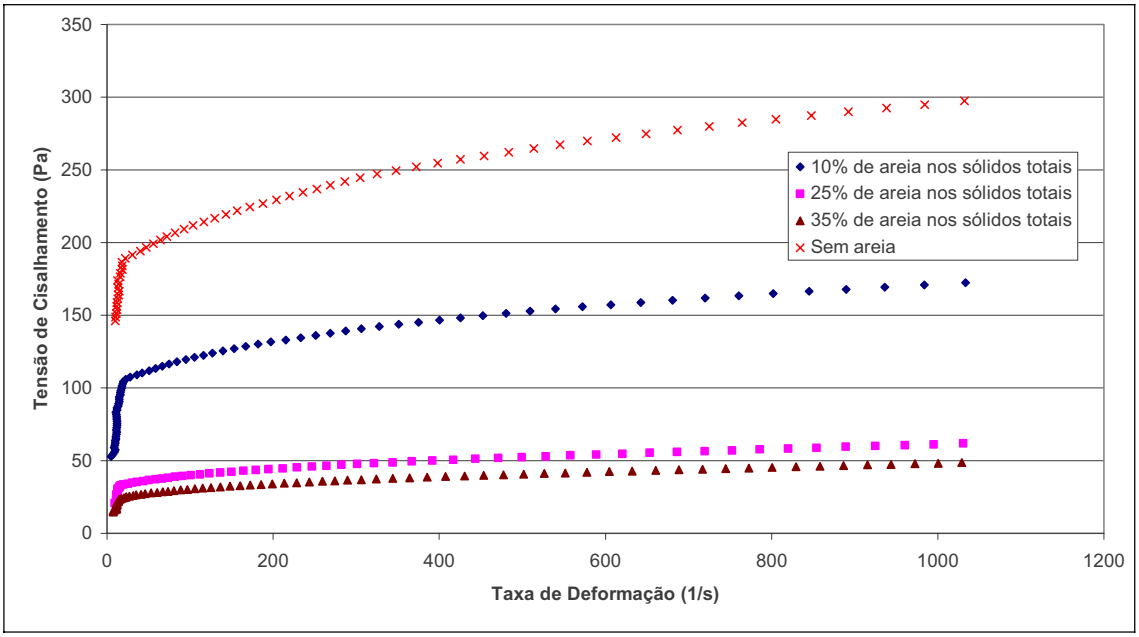


Figura 89: Ensaios com concentração de sólidos totais de 20% - adição de areia retida na peneira 100

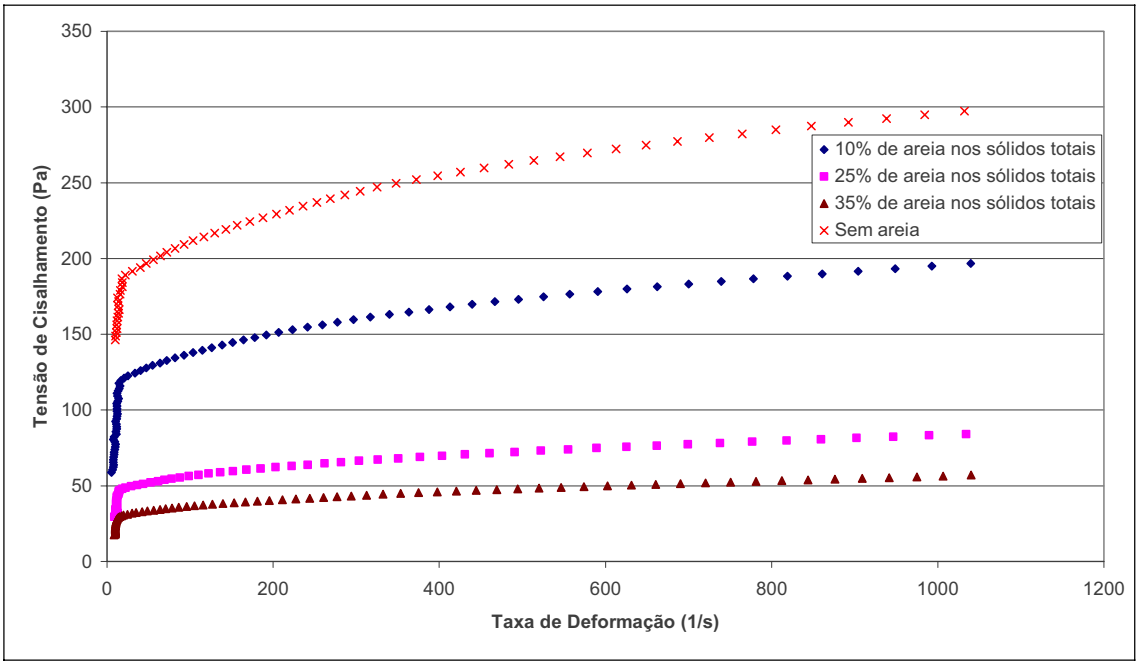


Figura 90: Ensaios com concentração de sólidos totais de 20% - adição graduada

Como já era esperado, o aumento da fração inerte (areia) nos sólidos totais causa uma diminuição da tensão crítica de todas as misturas ensaiadas, fato esse que é mostrado pelas Figuras 88, 89 e 90. Pode-se concluir que apenas ocorre o aumento das propriedades das curvas de escoamento (tensões críticas, tensões máximas, etc.), pela adição de sólidos inertes, quando não ocorrer a diminuição da concentração dos sólidos ativos na mistura intersticial.

Esta conclusão vem ao encontro de uma conclusão anterior, onde o comportamento global de uma mistura composta de água+sólidos ativos+sólidos inertes depende do comportamento da matriz fluida (água+sólidos ativos) que lubrifica os grãos inertes.

Numa segunda etapa de análise dos dados obtidos, foram plotadas as curvas de escoamento de cada tipo de areia adicionada para uma mesma porcentagem de adição de areia nos sólidos totais. Optou-se por realizar ensaios com as granulometrias extremas (areia retida na peneira 100 e areia retida na peneira 200) e com a granulometria graduada, para analisar os efeitos extremos e compará-los com os valores da granulometria graduada.

Os resultados obtidos podem ser vistos nas Figuras 91, 92 e 93. Os dados agrupados de tensões críticas dessa nova análise são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18: Tensões críticas para cada uma das adições e tipos de areia

Adição de areia (%)	Tipo de areia	τ_c (Pa)
10	Graduada	99,69
	200	87,65
	100	76,39
25	Graduada	38,53
	200	38,34
	100	23,47
35	Graduada	23,9
	200	22,63
	100	18,52

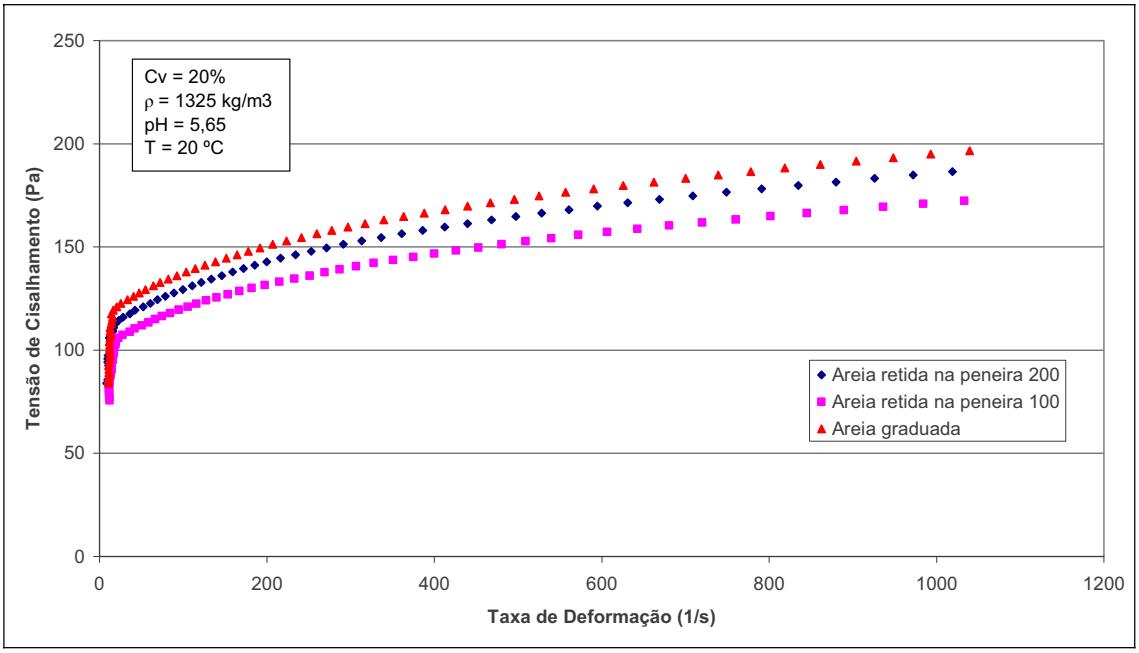


Figura 91: Comparação das curvas com adição de 10% de areia nos sólidos totais

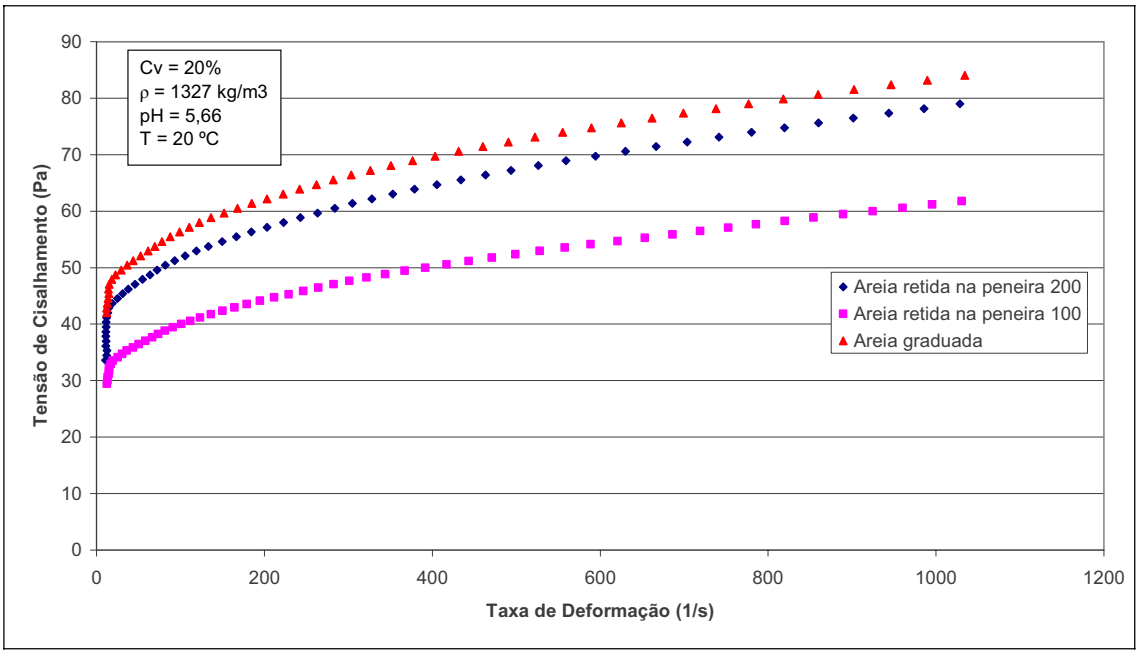


Figura 92: Comparação das curvas com adição de 25% de areia nos sólidos totais

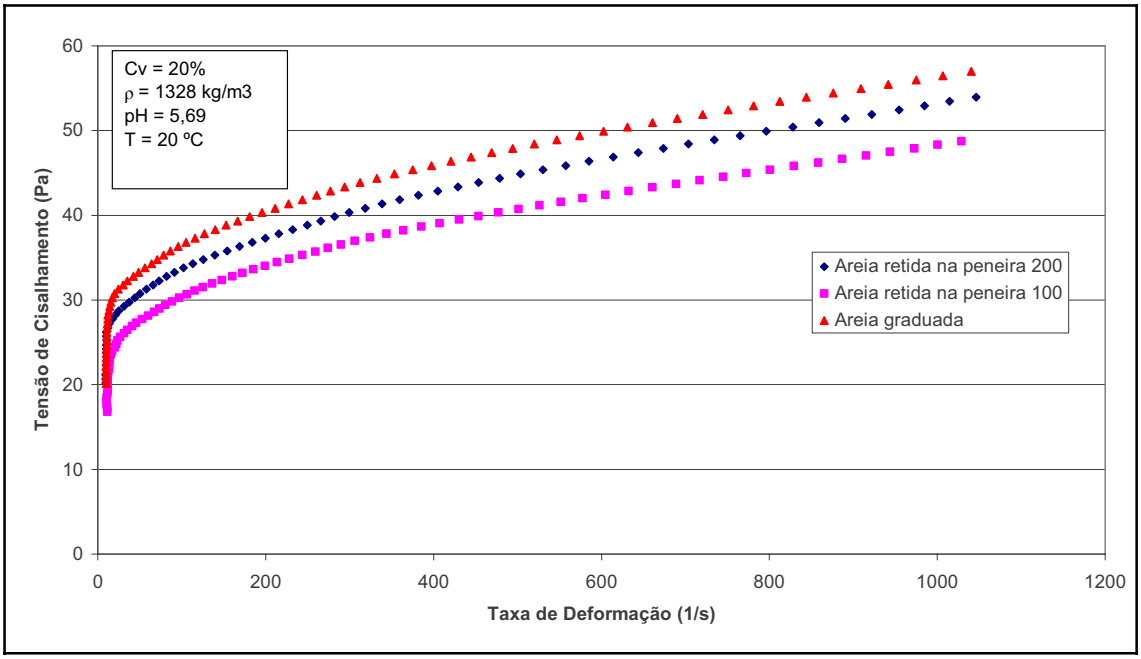


Figura 93: Comparação das curvas com adição de 35% de areia nos sólidos totais

Pode ser visto nas figuras apresentadas para esta análise que em todos os casos as amostras compostas com areia graduada apresentam as maiores tensões, seguida da amostra de areia retida na peneira 200 e, por fim, as amostras de areia retida na peneira 100.

Comparando esses dados com os dados obtidos e analisados no item ***Ensaios com Misturas de Água+Argila+Areia Fina com Mistura Intersticial Constante de*** C_v ***=15%***, é possível fazer as seguintes conclusões:

- As misturas possuíam misturas intersticiais variando de C_v=18,37% a 13,98%;
- Para a mistura de C_v intersticial de 18,37% e adição de 10% de sólidos inertes nos sólidos totais, as variações de tensões não são muito significativas entre as amostras de vários tipos de areia (variações de aproximadamente 10% entre os valores de tensão).

  Entretanto era esperado que, para esse caso, a amostra preparada com areia retida na peneira 100 apresentasse as maiores tensões. Essa variação do efeito poderia ser causada pela maior concentração da mistura intersticial de 18,37%;
- Para a mistura com C_v intersticial de 15,79% e 25% de areia nos sólidos totais (Figura 90), ocorreu um distanciamento entre as curvas de areia retida na peneira 200, que ficou próxima a composta de areia graduada,

e a retida na peneira 100. Para essa mistura parece que o efeito do tamanho dos grãos volta a influenciar a mistura, deixando a composição de areia retida na peneira 200 com maiores tensões que a amostra de areia retida na peneira 100;

O fato da amostra de areia graduada possuir tensões ligeiramente maiores que a amostra de areia retida na peneira 200 pode ser explicada da seguinte forma: essa composição está em uma zona de transição, dessa forma, a areia com propriedades médias (areia graduada) deve possuir as maiores tensões como apresentado na Figura 92;

- Para a amostra composta de mistura intersticial de C_v=13,98% e 35% de areia os resultados voltam a apresentar os valores esperados. A amostra de areia retida na peneira 200, com o menor diâmetro, possui as maiores tensões, seguida da areia retida na peneira 100. Neste caso, o fluido intersticial apresenta um valor de C_v mais próximo ao apresentado no item **Ensaios com misturas de água+argila+areia fina com mistura intersticial constante de C_v =15%.**

  Estudos apresentados por Lledo (2003) mostram que as propriedades reológicas, como tensão crítica, são valores dependentes da concentração da mistura intersticial e têm crescimento exponencial. Dessa forma, pequenas mudanças nas concentrações dos sólidos que formam as misturas intersticiais poderiam causar uma grande mudança nos valores das tensões críticas das misturas. Assim, as variações das concentrações em volume das misturas intersticiais poderiam modificar os comportamentos encontrados quando da adição de sólidos inertes em misturas com fluido intersticial constante.

Além dos comentários já realizados neste item, pode-se lembrar que um dos objetivos desta proposta de mestrado é determinar a validade do modelo reológico de Herschel-Bulkley para misturas compostas de água+argila com adição de materiais inertes. Como foi mostrado neste item, foi possível realizar o ajuste das curvas reológicas (de misturas homogêneas formadas por água+argila+areia fina) para o modelo reológico proposto. Pode-se, assim concluir, que o modelo continua válido para essas misturas.

V.3.3 - Análise da influência dos parâmetros geométricos dos grãos no comportamento reológico das suspensões

Analisando o efeito do aumento da tensão crítica de uma suspensão formada de água+argila, em função da adição de sólidos inertes, conclui-se que esse aumento é provocado pela fração de sólidos inertes adicionados à mistura não-newtoniana e ao diâmetro dos grãos. A partir das análises reométricas descritas anteriormente pode-se observar que o diâmetro dos grãos afetava a tensão crítica das amostras de duas formas distintas:

- A primeira forma foi uma influência direta: o aumento do diâmetro dos grãos em uma mistura provoca uma maior dificuldade no escoamento, dessa forma, misturas compostas de partículas inertes de diâmetros maiores devem possuir maiores tensões criticas. Entretanto o crescimento da tensão crítica em função do aumento do diâmetro dos grãos é uma função monotônica, ou seja, após certo diâmetro o aumento do tamanho do grão influenciaria muito pouco a tensão crítica;

- O segundo tipo de influência é indireto: para duas amostras de grãos com a mesma massa (considerando uma massa específica dos sólidos constante), a maior área superficial dos grãos estará associada à amostra com menor diâmetro dos grãos. Como foi comentado nos itens anteriores, a adição de frações de sólidos inertes com grande área superficial diminui a água livre da mistura intersticial (responsável por lubrificar os contatos entre os grãos). Com isso, a tensão crítica da amostra tende a aumentar. Entretanto, o efeito da área superficial dos sólidos sobre a tensão crítica não é monotônico e, segundo análises dos dados reométricos, deve ser proporcional a um coeficiente n ($1 < n < 2$).

O aumento da tensão crítica correlacionado com o aumento da área superficial dos grãos é mais intenso devido ao fato dos grãos debitarem água do fluido intersticial e, por conseguinte, aumentarem a concentração em volume da matriz fluida formada de água+argila. Como pode ser visto na Figura 79, amostras com maiores C_vs nos fluidos intersticiais apresentam

crescimentos mais significativos nas suas resistências, devido a adições de grãos.

Seguindo essas considerações, pode-se criar um número adimensional que adicionaria à tensão crítica do fluido intersticial um valor, que seria função da concentração (em volume) dos sólidos no volume total da mistura, do diâmetro dos grãos e do volume dos sólidos totais da mistura. Esse número adimensional é dado pela Equação 67.

$$X = 1 + \frac{\varphi^{0,5} C_{V\,inerte} A_s^{\,1,25}}{K_h V_{st}}, \text{ sendo} \qquad (67)$$

φ : diâmetro médio dos sólidos inertes (cm);

$C_{Vinerte}$: concentração em volume dos sólidos inertes no volume total da mistura;

A_s : área superficial dos sólidos inertes (cm^2);

K_h : constante numérica (37); e

V_{st} : volume total dos sólidos da mistura (cm^3).

O número adimensional dado pela Equação 67 foi plotado *versus* uma tensão crítica adimensional indicada por $\frac{\tau_c}{\tau_{ci}}$, sendo τ_c a tensão crítica da mistura composta de água+argila+areia fina e τ_{ci} a tensão crítica da matriz fluida composta de água+argila.

Com o gráfico da tensão crítica adimensional contra X (Figura 94) pode-se determinar uma curva de ajuste da forma: $\frac{\tau_c}{\tau_{ci}} = X^{1,3314}$.

Assim, substituindo o valor de X dado pela Equação 68, tem-se:

$$\tau_c = \tau_{ci}\left(1 + \frac{\varphi^{0,5} C_{V\,inerte} A_s^{\,1,25}}{K_h V_{st}}\right)^{1,3314} \qquad (68)$$

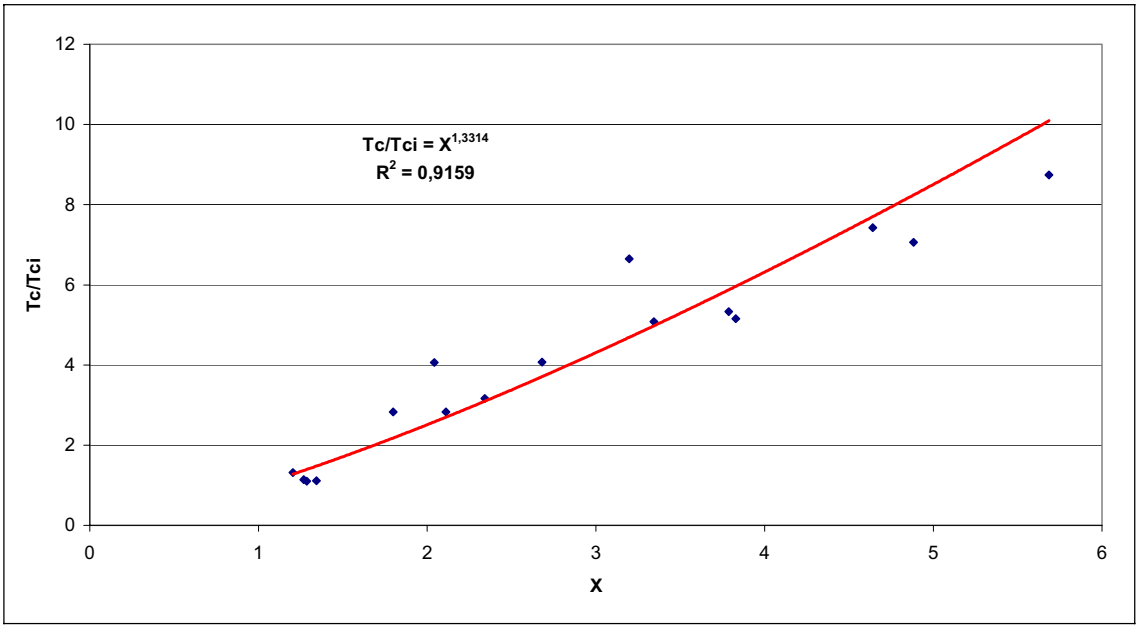


Figura 94: Curva de ajuste para os dados de Tensão Crítica Adimensional x X

A variação entre as tensões críticas experimentais e estimadas pode ser vista na Figura 95.

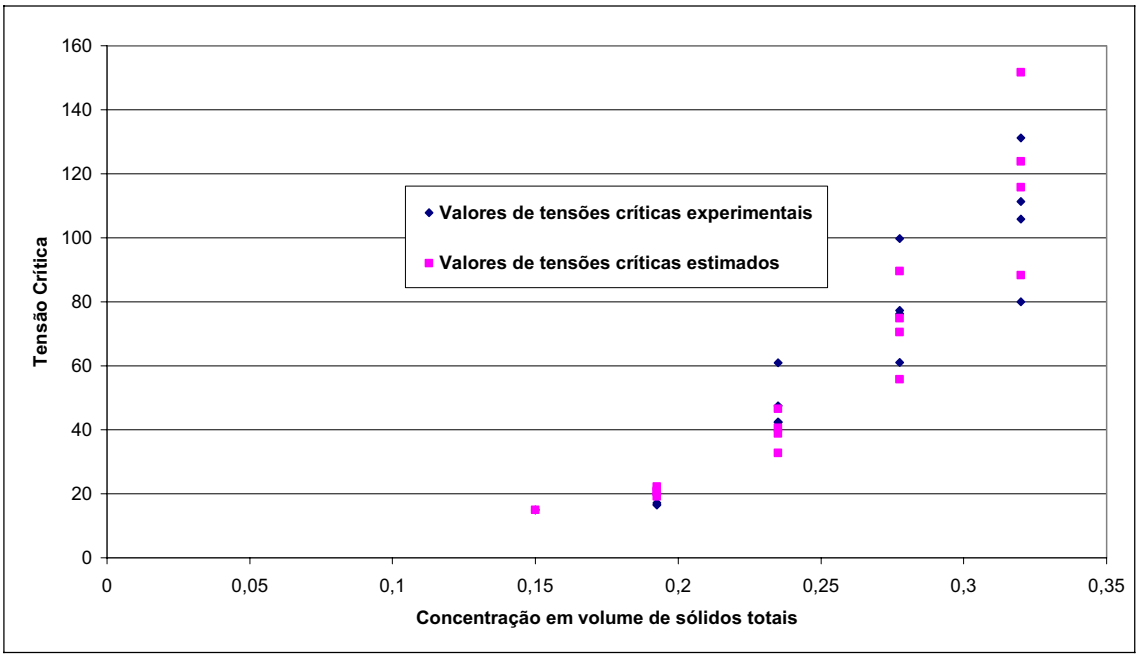


Figura 95: Comparação entre dados de tensões críticas experimentais e estimados pela Equação 78

A Figura 96 apresenta a variação da curva de crescimento da tensão crítica adimensional para 2 valores limites da potência do adimensional X ($\frac{\tau_c}{\tau_{ci}} = X^{1,25}$ e $\frac{\tau_c}{\tau_{ci}} = X^{1,60}$).

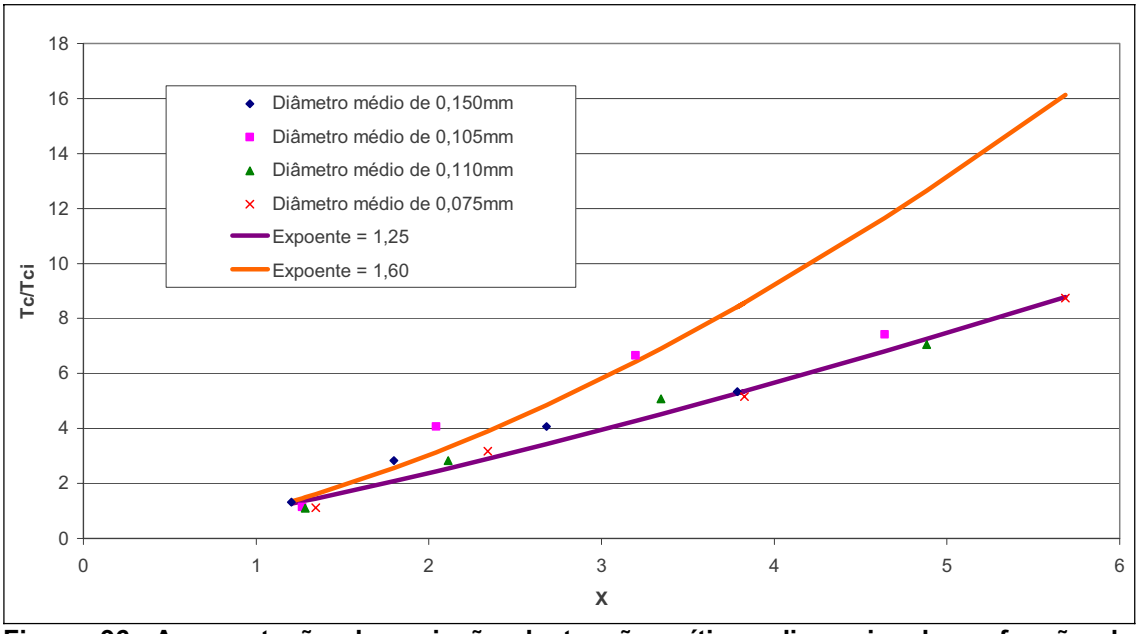


Figura 96: Apresentação da variação da tensão crítica adimensional em função do diâmetro dos sólidos inertes e valores limites de índice de crescimento

Além disso, para comparação de resultados, foram plotados dados experimentais de tensões de misturas compostas por água+argila e água+argila+areia fina junto com os dados experimentais de Ancey (2002). Essa comparação de dados pode ser observada na Figura 97.

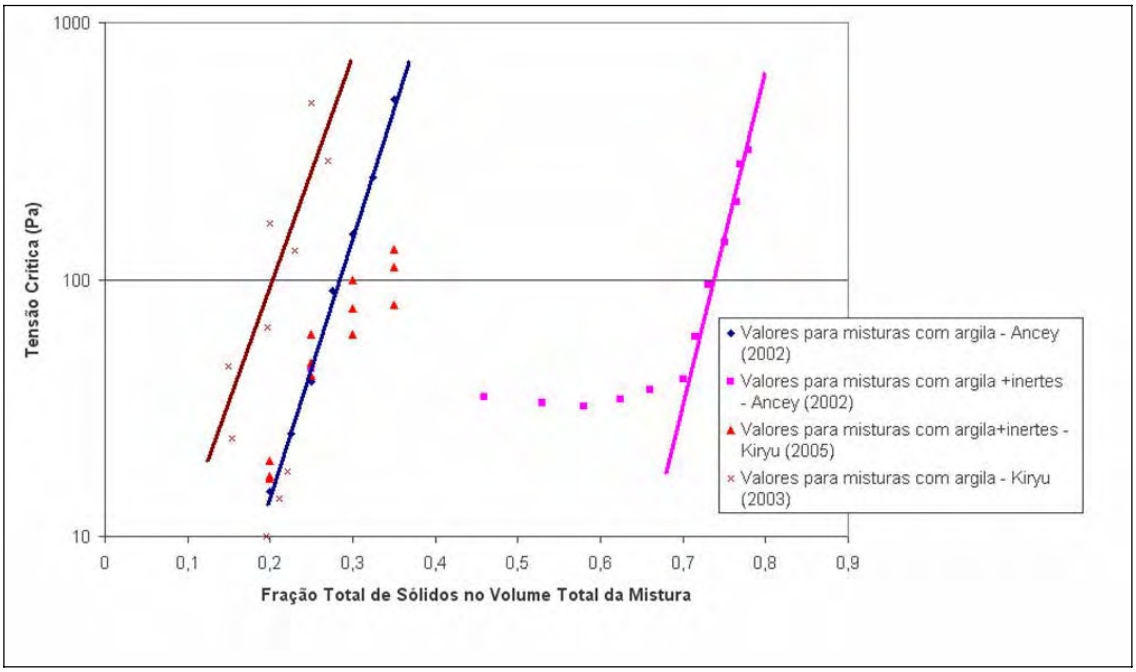


Figura 97: Comparação entre dados de tensão crítica de Ancey (2002) e Kiryu (2005)

Pode-se notar que os valores de tensão crítica encontrados por Kiryu (2005) seguem a mesma tendência dos valores de tensão crítica encontrados por Ancey (2002) para misturas compostas de água+argila. Entretanto vale

ressaltar que as misturas compostas de água+argila+inertes de Ancey possuem uma lacuna, qual seja: Ancey possui dados de tensão crítica para uma mistura de C_v=25%. Após esse ponto, somente para uma mistura de C_v=45%, deixando, assim, uma lacuna de pontos para valores com 25%< C_v<45%. A tensão crítica de C_v=25%, estimada por Ancey, está dentro da nuvem de pontos encontrada por Kiryu (2005). Além disso, os outros valores encontrados por Kiryu estão dentro da faixa de C_v não coberta por Ancey (com fração inerte). Também é possível notar que o crescimento das tensões críticas para os dados das misturas apenas de argila de Ancey (2002) e Kiryu (2005) têm um crescimento da mesma ordem (as retas que representam o crescimento de cada um desses conjuntos são praticamente paralelas). O possível deslocamento entre os pontos de tensão crítica (apenas para amostras constituídas de água+argila) dos dados apresentados por Ancey (2002) e Kiryu (2005) pode ser devido (ou é certamente) a diferenças mineralógicas dos materiais coloidais.

V.4 - Parte 4

Na busca de uma lei de atrito para misturas de fluidos hiperconcentrados acrescidos de partículas inertes, escoando em canais, foram realizados ensaios de superfície livre, primeiramente em um canal piloto de acrílico e, em seguida, no canal residente do Laboratório de Hidrologia e Hidrometria da Unesp/Ilha Solteira. O equacionamento matemático utilizado é aquele apresentado no item **Escoamento de um fluido hiperconcentrado sobre um plano inclinado.**

O procedimento experimental e os resultados obtidos nas primeiras campanhas experimentais são comentados no Anexo II desta Dissertação.

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES FINAIS

Ainda que por opção deliberada deste pesquisador, os comentários, as discussões e conclusões já tenham sido arrolados durante a apresentação dos resultados, passa-se em revista, neste item, as grandes linhas conclusivas desta Dissertação, quais sejam:

- Os resultados encontrados nos testes reométricos estão em consonância com a literatura. Os modelos propostos por Bagnold (1954), para descrever o comportamento reométrico com a adição de material inerte em fluidos newtonianos, adaptada à teoria de fluidos hiperconcentrados, se ajustam bem às curvas de escoamento obtidas. Nas amostras ensaiadas com fluido intersticial hiperconcentrado foram observadas as regiões caracterizadas por Bagnold: região macro-viscosa e inercial de grãos. Na região inercial de grãos a característica dilatante da curva de escoamento, descrita por Bagnold (1954) é, na realidade, um efeito de transferência de quantidade de movimento do fluido para os grãos (inicialmente se movimentando como corpo de fundo) que acaba por ressuspendê-los (conforme item **VI.2.2.2.3**).

- As curvas de escoamento das amostras elaboradas seguem os mesmos modelos reológicos das misturas intersticiais. As amostras com baixas concentrações de partículas coloidais apresentam curvas de escoamentos quase lineares como fluidos newtonianos, enquanto que as curvas de misturas com altas concentrações de argila seguem o modelo viscoplástico de Herschel-Bulkley. Além disso, para os ensaios reométricos, foi observado que a adição de sólidos inertes modifica os parâmetros reológicos da mistura, porém, se a mistura intersticial for capaz de manter o fluido homogêneo, o modelo reológico assumido pelo fluido intersticial ainda é mantido após a adição de material inerte. Dessa forma, o modelo reológico proposto para misturas de água+argila ainda é válido para misturas homogêneas de água+areia fina+argila (conforme item **VI.3.2**).

  Também foi notado que a granulometria dos sólidos inertes influencia na variação dos parâmetros do modelo reológico. Entretanto, essa variação depende da concentração dos sólidos inertes adicionados e da

concentração do fluido intersticial. Para essa análise, deve-se identificar qual dos materiais da mistura sofre maior variação após a adição do material inerte e qual a variação gerada por cada tipo de partícula adicionada (por exemplo, as partículas de diâmetros menores possuem maior área superficial e, em uma mistura com pouca água livre, podem afetar significativamente as condições da matriz fluida debitando água da mistura para molhar os grãos), o que acarreta a variação do comportamento reológico de cada uma das misturas ensaiadas.

Nos ensaios com concentração de sólidos totais constante no volume total da mistura foi observado que o aumento da fração granular nos sólidos totais diminui as características plásticas da mistura global. Esse resultado já era esperado, pois a diminuição das partículas coloidais deveria levar a esse efeito, além disso, estudos de outros pesquisadores (COUSSOT, 1997 e ANCEY, 2002) confirmam essas observações.

- O modelo de lei de atrito proposto por Lledo (2003) para misturas compostas de água+colóides, com base no modelo reológico de Herschel-Bulkley, continua sendo válido para misturas homogêneas compostas de água+colóides+grãos, desde que esteja enquadrado nas hipóteses que validam o modelo de Herschel-Bulkley e garantam ressuspensão dos inertes na matriz intersticial. Vale observar que o modelo de lei de atrito deve ser calibrado em função da geometria do problema ficando sob a forma: $(G-1) = k_1 Hb^{k_2}$, sendo k_1 e k_2 constantes que devem ser ajustadas experimentalmente.

Perspectivas Futuras:

Como perspectiva futura, para esta Dissertação de Mestrado, pode-se apontar:

- Investigar a Influência dos sólidos granulares no comportamento do índice 1,3314 apresentado na Equação 68;

- Realizar ensaios reométricos aumentando o controle com relação a granulometria dos sólidos pouco reativos, bem como a influência do coeficiente de forma das partículas granulares; e

- Determinar as funções de forma k_1 e k_2 para escoamentos de superfície livre nos quais a condição de plano infinito não é atingida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANCEY, C. *Rhéophysique des suspensions concentrées Application à la géophysique alpine*. Grenoble, 2002. 92p. Tese (Doutorado em Unité de Recherché Erosion Torrentielle), Institut National Polytechnique de Grenoble.

2. BAGNOLD, R.A. *Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under sheer.* Series A. London: Proc. Roy. Soc. London, 1954. 225p.

3. BATCHELOR, G.K. The stress system in a suspension of force free particle. *J. Fluid Mech*, v.41, p.545-570, 1970.

4. BATCHELOR, G.K. The stress generated in a non-dilute suspension of elongated particles by pure straining motion. *J. Fluid Mech*, v.46, p.813-829, 1971.

5. BATCHELOR, G.K., GREEN, J.T. The determination of the bulk stress in a suspension of spherical particles to order Φ^2. *J. Fluid Mech*, v.56, 375p, 1972.

6. BARBOSA, M. P., et.al. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2005, Fortaleza. *Avaliação do comportamento reológico e mecânico da calda de cimento fabricada com microcimentos do tipo MC-20 e MC-30. Brasil: IBRACON.*

7. BINGHAM, E.C. *Fluidity and Plasticity*. New York: McGraw-Hill, 1992.

8. BORGES, A.L.O., TARQUI, J.L.Z. In: SILUSBA, 4, 1999, Coimbra-Portugal. *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.

9. BOYER, S. *Détermination des propriétés rhéologiques des laves torrentelles à l'aide d'expériences d'écoulements sur in plan incliné*. Grenoble, 1994. Tese (Doutorado em DEA MMGE), Institut National Polytechnique de Grenoble.

10. CHEN. C.L. Generalized viscoplastic modeling of debris flow. *Journal of Hydrology*, v.114, p.237-258, 1988.

11. CHEN. C.L. General solution for viscoplastic debris flow. Journal of Hydrology, v.114, p.259-282, 1988.

12. COUSSOT, P. *Rhéologie des boues et laves torrentielles*: Étude de dispersions et suspensions concentrées. Grenoble, 1988. Tese (Doutorado),Institut National Polytechnique de Grenoble.

13. COUSSOT, P., PIAU J.M. On the behavior of mud suspensions. *Rheologica Acta*, v. 33, n. 3, p.175-184, 1994.

14. COUSSOT, P. *Rhéologie des laves torrentielles.* La Houille Blanche, 1994.

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

16. COUSSOT, P. *Rheology of mud suspension*: Mudflow Rheology and dynamics. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. 169p. Monografia da International Association for Hydraulic Research.

17. COX, R.G. The stead motion of a particle of arbitrary shape at small Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanic*, v. 23, 1974.

18. DU PLESSIS, M.P., ANSLEY, R.W. Settling parameters in solids pipelining. *ASCE*, 1967.

19. EINSTEIN, A. *Investigation of the Brownian movement*. 19 ed. New York: Dover publication, 1956. 591p.

20. ENGELUND, F., WAN Z. Instability of hyperconcentrated flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.110, n.3, p. 219-233, 1984.

21. GARCIA A., JUAN, A. *Experimental and analytical investigation of granular-fluid mixtures down inclines.* Montreal, 1992. 156p. Tese (Doutorado em Applied Mechanic), McGill University.

22. HILL, R. *The mathematical theory of plasticity*. San Francisco: Oxford University press, 1950.

23. HUTTER, K., SAVAGE, S.B. Discussion on law of resistance of hyperconcentration flow in open channel. *Scientia Sinica*, v.25, p.1332-1342, 1982.

24. JIONGXIN, X. Erosion caused by hyperconcentrated flow on the Loess Plateau of China. *Catena*, v.36, p.1-19, 1999.

25. JOHSON, A.M. *Physical process in Geology*, Freeman Coper and Co. 577, 1970p.

26. KAPUR, P.C., SCALES, P.J., BOGER, B.V., HEALY, T.W. A theoretical framework for the yield stress of suspensions loaded with size distributed particles. *American Institute of Chemical Engineering Journal*, 43p,1997.

27. KIRYU, H.S. *Investigação de um modelo reológico para misturas água+detritos a partir das propriedades mecânicas dos compostos água+argila+sólidos inertes*. 2005. 96p. Primeiro Relatório FAPESP – proc. 03/10686-5.

28. KIRYU, H.S. *Investigação de um modelo reológico para misturas água+detritos a partir das propriedades mecânicas dos compostos água+argila+sólidos inertes*. 2005. 104p. Segundo Relatório FAPESP – proc. 03/10686-5.

29. KYTOMAA, H.K., SCHMID, P. J. *On the collision of rigid spheres in a weakly compressible fluid*. 1992.

30. KRIEGER, I.M., DOUGHERTY, T.J. A mechanism for non-Newtonian flow in suspension of rigid spheres. *Trans. Soc. Rheol*. v.III, p.137-152,1959.

31. LEIGHTON, D. and ACRIVOS, A. The shear-induced migration of particles in a concentrated suspensions. *Journal of Fluid Mechanics*, 181p,1987.

32. LIAN, G. ADAM, M.J. THORNTON, C. Elastohydrodynamic collision of solid spheres. *Journal of Fluid Mechanical*, 311p, 1996.

33. 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*, v.149, Issue: 1-4, p.93-111, 1998.

34. LI, J., YUAN, J., BI, C., LUO, D. The main features of the mudflow in Jiang-Jia River. *Zeit. Geomorph*, v.27, n.3, p.325-341, 1983.

35. LLEDO, F. S. *Estudo Teórico – Experimental em Via de Determinação de uma Lei de Atrito em Escoamento de Fluidos Hiperconcentrados*. Ilha Solteira, 2003. 150p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Técnologia Ambiental) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

36. Maciel, G. F.,et. Al. In: MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA, 2004, Lisboa. *Abordagem teórico-numérico-experimental de escoamento de lamas em canais inclinados.* Lisboa: APMTCA.

37. MAJOR, J.J., PIERSON, T.C. In: SYMPOSIUM PROCEEDINGS OF HYDRAULICS/HYDROLOGY OF ARID LAND, 1990, San Diego. *Rheological analysis of fine-grained natural debris flow material*. San Diego: American Society of Chemical Engineering, p.228-231.

38. MAJOR, J. J., PIERSON, T.C. Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resource Resolution*, v.28, p.841-857, 1992.

39. MALEKZADEH, M. J. *Flow of liquid-solid mixtures down inclined chutes*. Montreal, 1994. 212p. Tese (Doutorado em Applied Mechanics), McGill University.

40. MATIJASIC, G., GLASNOVIC, A. Influence of Dispersed Phase Characteristics. *Chem. Biochem. Eng. Q*., v.16, p.164-172, 2002.

41. MOFFAT, R. J. Describing the Uncertainties in Experimental Results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, p.3-17, 1988.

42. O'BRIEN, J. S., JULIEN, P.Y. Laboratory analysis of mudflows properties. *Journal of Hydrology Engineering*, v.114, n.8, p.877-887, 1988.

43. OLIVEIRA, I.R., STUDART, A.R., PILEGGI, R.G., PANDOLFELLI, V.C. *Dispersão e empacotamento de partículas:* princípios e aplicações em processos cerâmicos. São Paulo: Fazenda arte editorial, 2000. 224p.

44. OSTWALD, W. Uber die Geschwindigkeitsfunkion der viskosität disperser systeme, 1925.

45. QUEMADA, D. Phenomenological rheology of concentrated dispersion. *J. Mécan.Théor. Appl.,* n. spécial, p.267-288, 1985.

46. RUSSEL, W. B. *Brownian motion of small particles suspended in liquids*. 1981.

47. SENGUN, M.Z. AND PROBSTEIN, R.F. Bimodal model of slurry viscosity with applications to coal slurries: Part 1. Theory and experiment. *Rheologica Acta*, 28p, 1989.

48. VAN VLIET, J. H. *The elastohydrodynamic lubrication force in the squeeze motion of Hertzian deformation bodies*. 1996.

49. WILDEMUTH, C.R. AND WILLIAMS, M.C. A new interpretation of viscosity and yieldstress in dense slurries: coal and other irregular particles, *Rheologica Acta*, 24p,1985.

50. ZHOU, Z., SOLOMON, M.J., SCALES, P.J. AND BOGER, D.V. The yield stress of concentrated flocculated suspensions of size distributed particles. *Journal of Rheology*, 43p, 1999.

ANEXOS

ANEXO I - Conceitos Básicos

A I.1 - Fluido e tensão crítica

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 tensões de cisalhamento sem apresentar nenhuma deformação. Esta tensão, a qual o fluido não-Newtoniano pode resistir sem se deformar, é chamada tensão crítica de cisalhamento ou tensão de escoamento.

A I.2 - Viscosidade

Quando um fluido sofre uma deformação ocorre uma interação interna entre as partículas (meios contínuos), 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 para a viscosidade, é relativa à variação da tensão de cisalhamento pela variação da taxa de deformação, a qual se mantém constante, em um fluido Newtoniano.

A I.3 - Hipótese do meio contínuo

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

Para o caso especifico de lamas, o mesmo terá seu comportamento considerado como meio de uma única fase e contínuo com número de

Knudsen << 1 (razão entre a distância característica e o livre percurso médio de moléculas).

A I.3.1 - 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.

A I.3.1.1 - Conservação da massa

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

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad \text{ou ainda} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial X_i} = 0 \tag{69}$$

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).

A I.3.1.2 - Balanço 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:

$$\rho \frac{dU_i}{dt} = \rho F_i + \frac{\partial T_{ij}}{\partial X_j} \qquad (70)$$

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

sendo:

F_i: forças de corpo;

T_{ij}: tensor de tensões;

$\frac{d}{dt}$: derivada total.

A I.4 - Reologia

Ciência voltada ao estudo da deformação e escoamento de um fluido, sobre influência de tensões, considerada adequada a materiais *"complexos"* que não se enquadram numa simples classificação de sólido, líquido ou gás.

O termo reologia foi definido por E.C. BINGHAM em 1929, originado da palavra grega "rhein", que significa escoar, como o estudo da deformação e escoamento da matéria (TANNER, 1988).

A I.4.1 - Reometria

Reometria pode ser definida como o estudo das técnicas que possibilitam 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 são usadas para comparar os materiais.

Tais técnicas são usualmente padronizadas em concreto fresco ou na indústria alimentícia, por exemplo. No entanto, para o 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 limitados para a caracterização do fluido.

O objetivo da reometria é determinar as características do fluido a partir de medições feitas em escoamentos simples e controladas. Nestes testes o fluido é tensionado de maneira simples, de tal forma que poucas componentes do seu tensor de tensões sejam diferentes de zero. Assim, a partir das componentes da tensão de cisalhamento 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 em alguns dispositivos, com condições de borda fixas e determinadas (dentro de um tubo, entre placas paralelas, entre cilindros concêntricos, etc.). Esses aparelhos são chamados reômetros.

A escolha da geometria mais apropriada para materiais complexos, como pastas de água+cimento, 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.

A I.4.1 - Modelos reológicos

A seguir são apresentados alguns modelos matemáticos que representam diferentes tipos de comportamentos reológicos. Esses modelos são válidos para escoamentos simples e expressam a relação $\tau(\dot{\gamma})$ (tensão de cisalhamento 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:

$\tau = \mu\dot{\gamma}$, sendo: (71)

τ : Tensão de cisalhamento;
μ : Viscosidade do fluido; e
$\dot{\gamma}$: Taxa de deformação.

Este tipo de comportamento é observado com o ar, água, óleos, álcoois, etc.

Um modelo um pouco mais complexo é o modelo “power-law” (Oswald, 1925):

$\tau = a\dot{\gamma}^{n} \Rightarrow \mu = a\dot{\gamma}^{n-1}$, sendo: (72)

a e *n*: Parâmetros do fluido; e

μ : $\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$.

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:

$$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = f(\dot{\gamma}) \quad (73)$$

Onde $\mu_0 > \mu_\infty$ e *f* é uma função decrescente de $\dot{\gamma}$ que tem que ser escolhida de tal forma que $f(\dot{\gamma}) \to 1$ quando $\dot{\gamma} \to 0$ e $f(\dot{\gamma}) \to 0$ quando $\dot{\gamma} \to \infty$. 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: $\tau = \tau_c + f(\dot{\gamma})$. Alguns exemplos importantes são:

$\tau = \tau_c + \mu_B \dot{\gamma}$ (Bingham e Green – 1920), sendo: (74)

τ_c : Tensão crítica de escoamento; e

μ_B : Viscosidade plástica de Bingham.

$\tau = \tau_c + k\dot{\gamma}^n$ (Herschel-Bulkley – 1926), sendo: (75)

k : Parâmetro de consistência do modelo de Herschel-Bulkley; e

n : Índice de escoamento do fluido.

$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{\beta\dot{\gamma}}$ (Casson – 1959), sendo: (76)

β : Parâmetro de ajuste do modelo de Casson.

Em cada caso, os parâmetros τ_c, μ e *k* são diferentes e devem ser determinados experimentalmente. Esses modelos são aplicáveis, por exemplo, a concreto fresco, lamas, tintas, misturas hiperconcentradas, etc.

A Figura 98 ilustra alguns dos diferentes tipos de modelos reológicos encontrados na literatura.

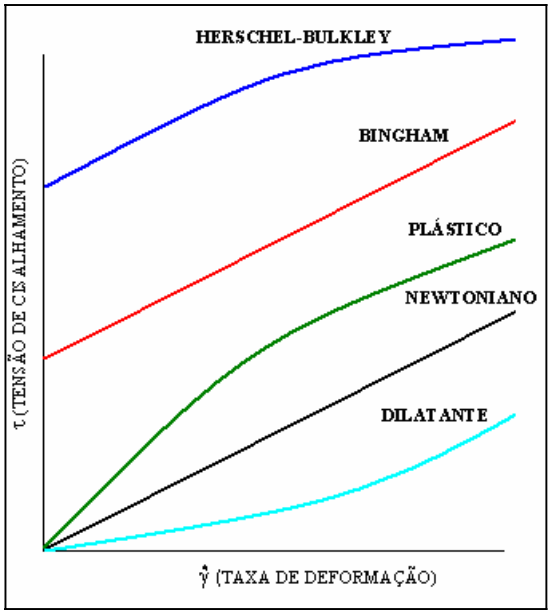


Figura 98: Reograma de diferentes tipos de fluidos em regime permanente

A I.4.2 - Viscosidade real e aparente

Em fluidos que se adaptam ao modelo reológico de Herschel-Bulkley, a viscosidade da amostra varia em função da taxa de deformação dos ensaios, esse comportamento pode ser visto na Figura 99.

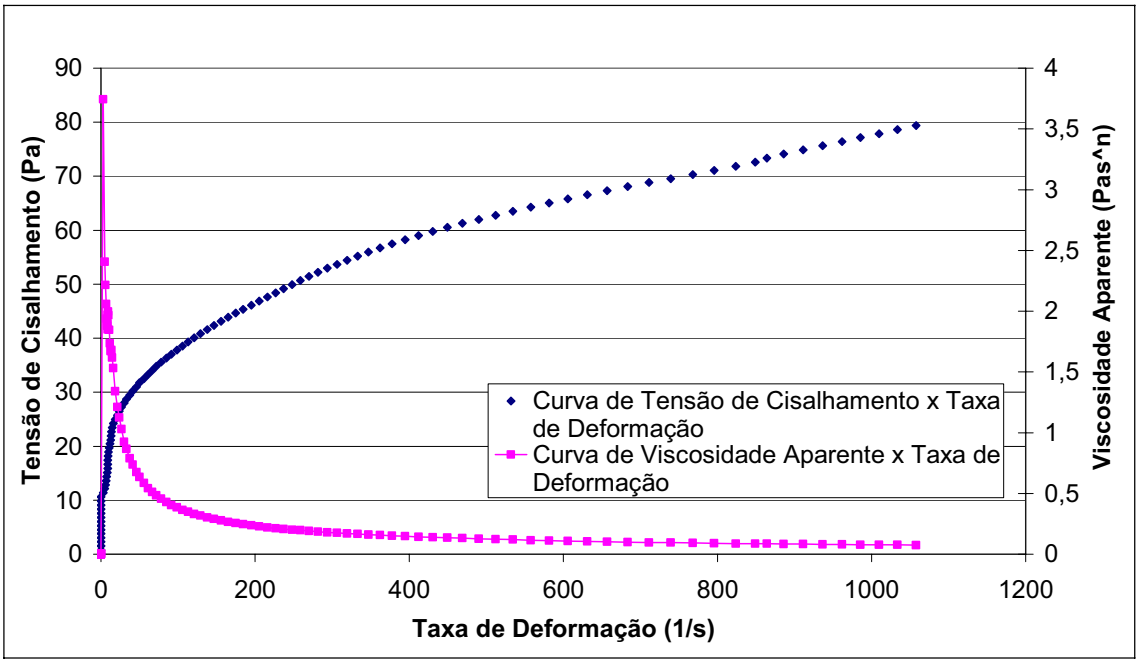


Figura 99: Variação da viscosidade da amostra (pasta de cimento MC 20) em função da taxa de deformação

Com base no modelo Newtoniano ($\tau = \mu\dot{\gamma}$), pode-se definir a viscosidade μ, sob a forma:

$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$, sendo: (77)

Assim, a viscosidade dita aparente, para o modelo reológico de Herschel-Bulkley, pode ser definida como sendo:

$\frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \mu_{ap} = \frac{\tau_c}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1}$, sendo: (78)

μ_{ap}: Viscosidade aparente do material;

τ_c : Tensão crítica de escoamento;

k : Parâmetro de ajuste do modelo de Heschel-Bulkley;

n : Índice de escoamento de Heschel-Bulkley; e

$\dot{\gamma}$: Taxa de deformação.

A viscosidade aparente indica, para uma determinada taxa de deformação aplicada a um fluido não-newtoniano, qual seria a viscosidade equivalente de um fluido newtoniano. Para fluidos que apresentam comportamentos não-newtonianos, a viscosidade "diferencial" é definida como $\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}}$.

Para o modelo de Herschel-Bulkley tem-se:

$\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = kn\dot{\gamma}^{n-1}$, sendo: (79)

$\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}}$: Derivada da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação.

Confirmando o que foi dito anteriormente, tanto a Equação 78, como a Equação 79 indicam que as viscosidades, real e aparente, de fluidos que se enquadram no modelo de Herschel-Bulkley, são dependentes da taxa de deformação.

Seguindo esta análise, podem ser visto na Figura 100, as viscosidades reais ($\mu = \mu(\dot{\gamma})$) representadas pelas tangentes (tan α_1 > tan α_2) e as viscosidades aparentes ($\mu_{ap} = \mu_{ap}(\dot{\gamma})$) (tan β_1 > tan β_2).

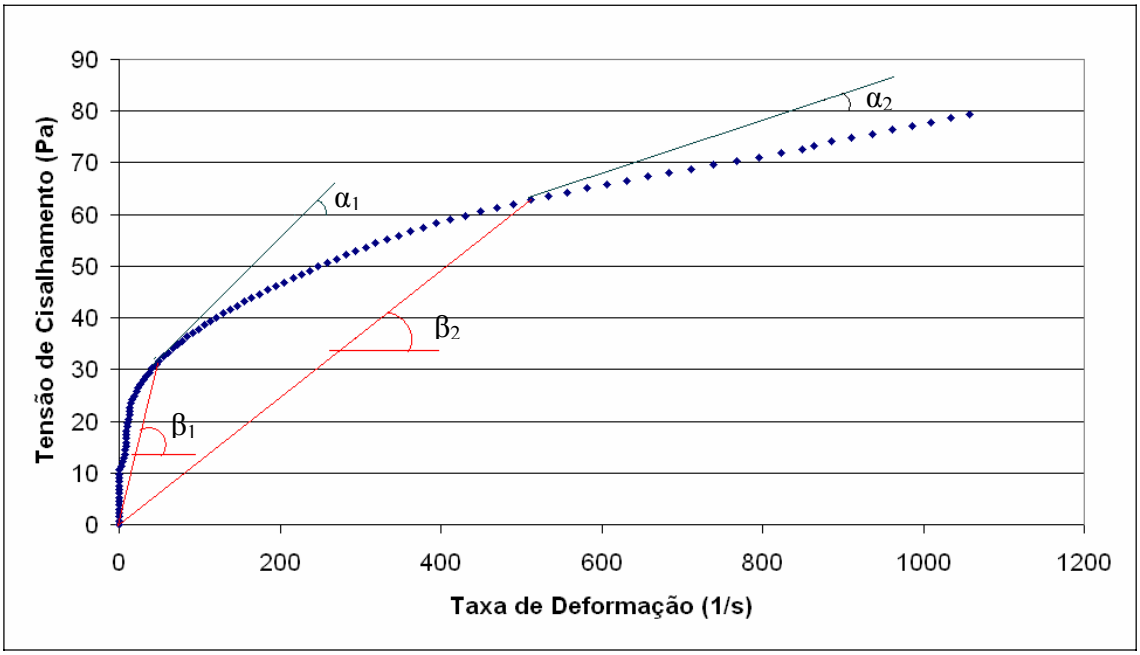


Figura 100: Variação da viscosidade em função da taxa de deformação para um fluido hiperconcentrado do tipo Herschel-Bulkley (viscosidades reais tan α_1 e tan α_2; viscosidades aparentes tan β_1 e tan β_2)

A I.4.3 - Visco-elasticidade

Certos tipos de líquidos (em geral os que possuem tensão crítica ou rigidez inicial) apresentam uma fase de resposta visco-elástica durante ensaios de cisalhamento. Essa resposta visco-elástica indica que o material, durante a transição, pode ter comportamento tanto de um líquido (viscoso) quanto de um sólido (elástico). Um esquema indicando essa transição é mostrado na Figura 101.

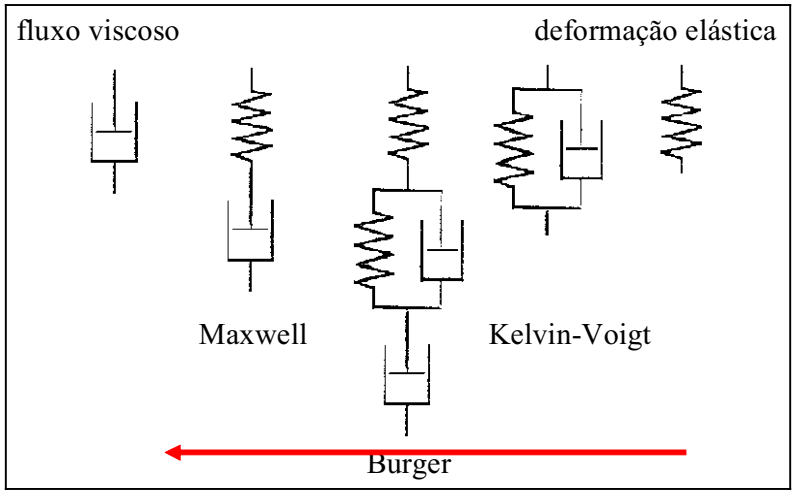


Figura 101: Transição do estado elástico para o estado viscoso (sentido da seta) passando pela transição viscoplástica

A visco-elasticidade pode ser medida em testes oscilatórios da seguinte forma:

- Aplica-se na amostra uma tensão de cisalhamento seguindo uma função harmônica e mede-se a deformação correspondente. Com esses gráficos pode-se definir o módulo visco-elástico (Equação 80) que é a razão entre a máxima tensão de cisalhamento aplicada e a máxima deformação sofrida pela amostra.

$G^* = \frac{\tau_0}{\gamma_0}$, sendo: (80)

G^*: Módulo visco-elástico;

τ_0 : Amplitude máxima de tensão; e

γ_0 : Amplitude máxima de deformação.

Como a resposta elástica é quantificada pelo valor de tensão conservada e a resposta viscosa é definida pela máxima deformação sofrida pela amostra e, esses dois valores estão em fase, podem-se determinar os módulos de conservação ou elástico *(G')* e de perda ou viscoso *(G'')*.

$G' = G^* \cos\delta$ (81)

$G'' = G^* \sin\delta$ (82)

Sendo δ a defasagem entre o módulo viscoso e o módulo elástico.

Outro indicador de interesse no estudo das propriedades visco-elásticas é a viscosidade complexa indicada pelo ponto de "*cross*" (transição entre o comportamento viscoso e o comportamento plástico do material), conforme ilustrada na Figura 102.

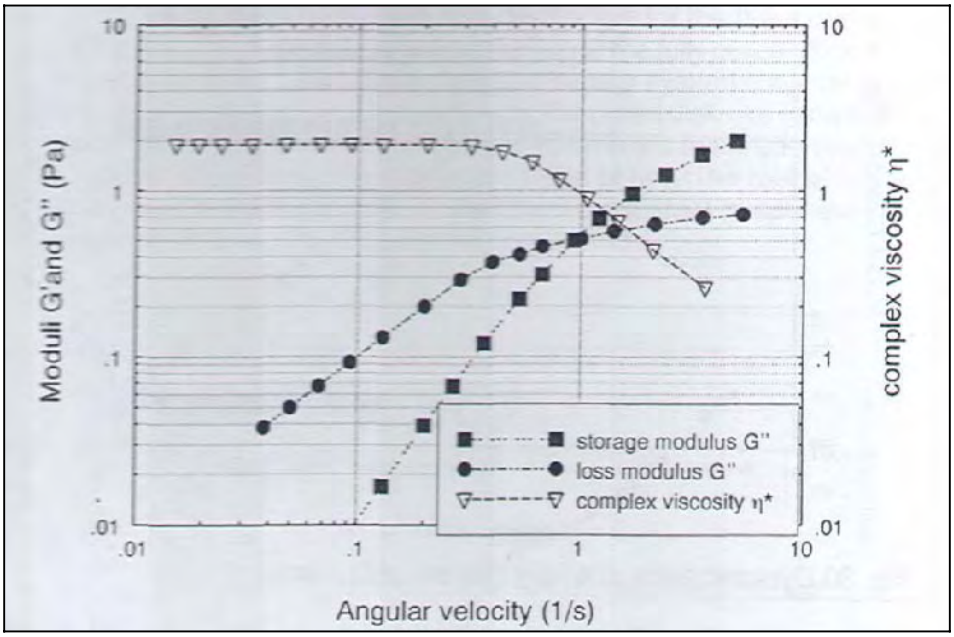


Figura 102: Viscosidade complexa indicado pelo ponto de "*cross*"

A I.4.4 - Tixotropia

Outra propriedade que os fluidos podem apresentar é a tixotropia. Trata-se de uma propriedade dependente do tempo e que permite avaliar a variação da viscosidade do material durante sua solicitação.

Deve ser considerado como "estando" tixotrópico um material que quando cisalhado (em carregamento) desorganiza sua estrutura interna e que ao ser descarregado procura reestruturar-se, recuperando suas propriedades iniciais numa certa escala de tempo.

Em linhas gerais, se essa recuperação de propriedades iniciais dá-se em tempo breve, o material apresenta pouca ou nenhuma tixotropia, e se, ao contrário, essa recuperação efetuar-se num tempo elevado, diz-se tratar de um material fortemente tixotrópico.

Ou ainda, nesse processo de carregamento/descarregamento, a tixotropia é identificada como uma diminuição da viscosidade em relação ao tempo para uma mesma taxa de deformação. Se ao contrário, essa

viscosidade elevar-se, diz-se tratar de um fenômeno anti-tixotrópico ou reopético.

O estudo dos efeitos de tixotropia é fundamental para estudos reológicos de fluidos já que, a simples coleta de certo material para análise pode modificar totalmente o comportamento da mistura inicial. Essa problemática é muito comum na determinação de parâmetros reológicos de fluidos alimentares como, por exemplo, iogurte, dentre outras.

ANEXO II - Escoamento em Superfície Livre

A II.1 - Ensaios de escoamento em superfície livre no canal piloto

Nos ensaios de superfície livre no canal piloto foram tomados os seguintes procedimentos: inicialmente foi feita uma mistura intersticial de água+argila com Cv=14,43% (a tensão crítica desse material é de $\tau_c \approx 20,63$ Pa), o valor de *N*, para o diâmetro médio de grãos de 0,15mm e densidade do fluido de 1228,60 kg/m^3, é de $N = 0,07 < 1$. Dessa forma, não ocorreria a sedimentação do material granular.

Foram adicionados 3,41% de areia, com a granulometria de 0,15mm no volume total da mistura.

Para os ensaios foi utilizado um canal piloto de acrílico com 2,00m de comprimento, 0,30m de largura e 0,15m de altura. Os ensaios foram realizados nas declividades de 3,6º; 5,4º e 7,90º e, para cada uma dessas declividades, foram realizados ensaios com várias vazões. A determinação da vazão foi feita pelo método volumétrico (era cronometrado o tempo para o enchimento de certo volume pela bomba que alimentava o canal).

Figura 103a: Vista superior de ensaio de escoamento com superfície livre

Figura 103b: Vista lateral de ensaio de escoamento com superfície livre

Figura 104: Determinação da vazão de escoamento experimental

Foram medidas as alturas de lâmina normal em 3 pontos do canal (longitudinalmente, a 0.90 m da parede de montante, a 1.0 m e a 1.10 m). A lâmina utilizada foi a média desses 3 valores.

Concomitantemente aos ensaios de superfície livre foram realizados ensaios reométricos, com a mistura em escoamento, para calibrar o modelo.

Nos ensaios de escoamento com mistura intersticial de água+argila com concentração de sólidos de 14,43% e adição de 3,41% de areia no volume total da mistura foram realizados 3 ensaios reométricos, os valores obtidos para o ajuste dos reogramas ao modelo de Herschel-Bulkley estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Valores dos ajustes dos reogramas ao modelo de Herschel-Bulkley

Reograma	τ_c (Pa)	k (Pas^n)	n
1	21,613	38,928	0,169
2	23,425	42,928	0,168
3	16,846	16,046	0,159

A densidade da mistura era de 1228,71 kg/m^3.

Com os valores obtidos do escoamento e da reometria foram determinados os seguintes valores:

Vazão por unidade de largura teórica: q teórico (a partir da Equação 60);

Vazão por unidade de largura experimental: q experimental (definido como vazão experimental / largura do canal); e

Relação lâmina normal / largura do canal.

Com esses valores foram determinados os erros relativos entre as vazões por unidade de largura semi-experimental e experimental, conforme metodologia de Lledo (2003). Como esperado, os erros relativos mostraram-se significativos e a condição de plano infinito bastante comprometida. Ainda assim, prosseguimos com a análise. Para cada um dos ajustes reométricos foram calculados os valores descritos anteriormente.

Reograma 1

Com os valores apresentados na Tabela 19 referentes aos parâmetros reológicos do ajuste da curva de escoamento 1 ao modelo Herschel-Bulkley, foram calibradas as curvas apresentadas na Figura 105.

Os valores apresentados foram determinados da seguinte forma:

Hb teórico (Equação 61);

Hb experimental definido como $Hb_{\exp erimental} = \frac{\tau_c}{k}\left(\frac{h}{U}\right)^n$, sendo

τ_c, k e n : parâmetros de Herschel-Bulkley;

h : altura da lâmina normal;

U : velocidade de escoamento.

(G -1) definido como $G-1=\frac{\tau_p}{\tau_c}-1$, sendo $\tau_p=\rho g h \sin\theta$

τ_p : tensão de parede;

τ_c : tensão crítica;

ρ : massa específica do fluido;

g : aceleração da gravidade;

h : altura da lâmina normal;

$sin\ \theta$: seno do ângulo do plano inclinado em relação à horizontal.

Dessa forma, plotando as curvas (G-1 x Hb) é possível determinar a relação entre τ_p e os parâmetros de escoamento e reológicos.

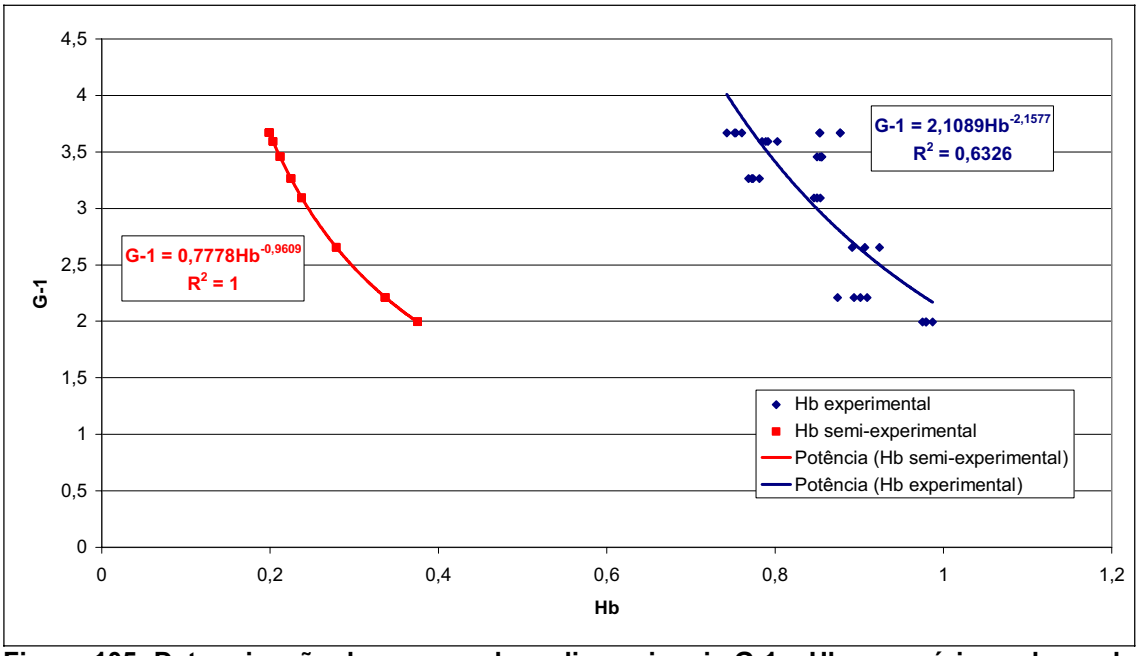


Figura 105: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 1

Reograma 2

Da mesma forma, para os parâmetros de ajuste do reograma 2 foram plotadas as curvas apresentadas da Figura 106.

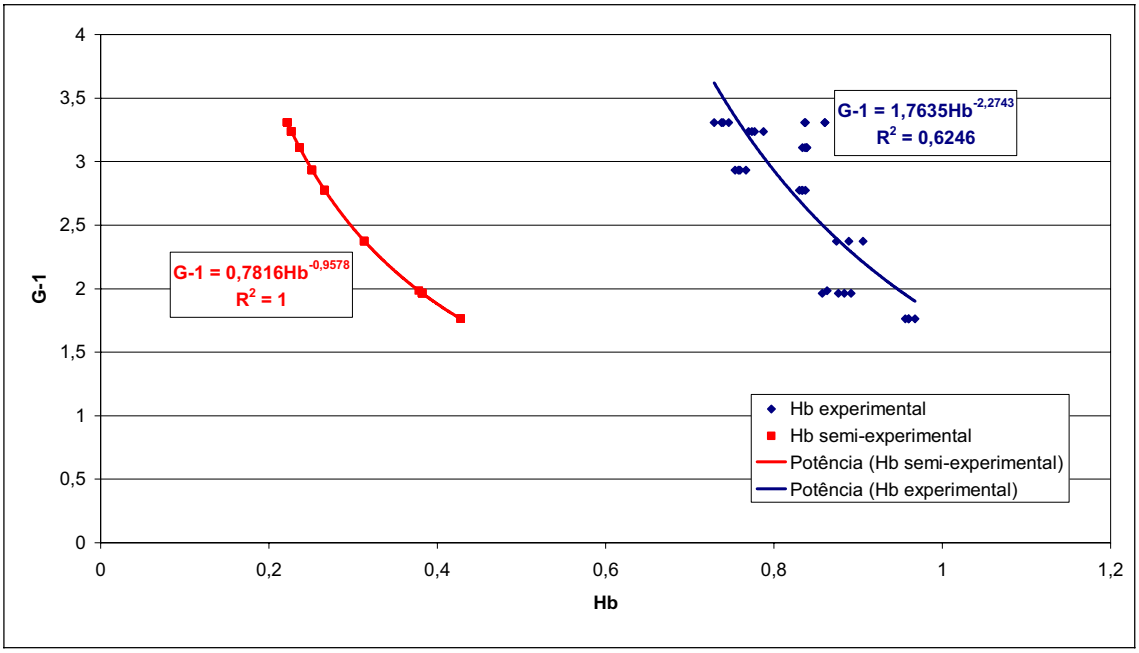


Figura 106: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 2

Reograma 3

Com relação aos parâmetros referentes ao reograma 3 foram plotadas as curvas aprestadas na Figura 107.

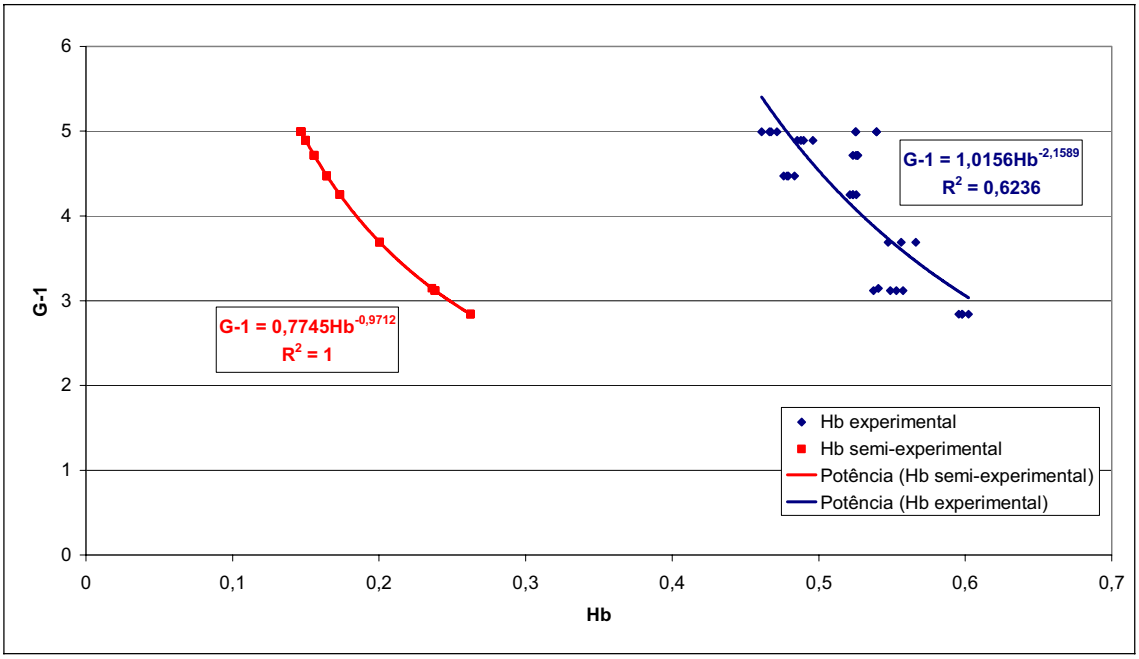


Figura 107: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 3

Deve-se lembrar que o cálculo da curva semi-experimental é chamada assim, pois é calculada a partir de dados experimentais e teóricos.

Como podem ser vistos nas Figuras 105, 106 e 107 os valores dos ajustes são:

Ajuste semi-experimental

Reograma 1: $G-1=0{,}7778Hb^{-0{,}9609}$;

Reograma 2: $G-1=0{,}7816Hb^{-0{,}9578}$;

Reograma 3: $G-1=0{,}7745Hb^{-0{,}9712}$.

Ajuste experimental

Reograma 1: $G-1=2{,}1089Hb^{-2{,}1577}$;

Reograma 2: $G-1=1{,}7635Hb^{-2{,}2743}$;

Reograma 3: $G-1=1{,}0156Hb^{-2{,}1589}$.

Segundo Lledo (2003), a equação da lei de atrito totalmente teórica deveria ser dada pela Equação $G-1=Hb^{-1}$. A equação encontrada pelo ajuste semi-experimental é ligeiramente diferente do modelo teórico. Esse efeito é devido ao fato das equações semi-experimentais serem dependentes de alguns parâmetros reométricos e dinâmicos. As equações calibradas com os dados experimentais estão consideravelmente deslocadas das suas correspondentes equações teóricas, essas variações devem ser devido às condições de plano infinito já que os escoamentos não conseguiram manter a relação de altura de lâmina / largura do canal abaixo de 1/10, além das condições experimentais terem sido controladas parcialmente, isto é; trabalhou-se com concentração elevada, não tendo sido realizado o controle do escoamento a montante.

Além disso, devido à alta concentração do fluido escoado, não foi possível estabelecer uma região no escoamento com perfil dominantemente uniforme, assim, durante os ensaios, a altura da lâmina normal variava longitudinalmente no canal, não possibilitando a tomada de um valor constante de lâmina no escoamento.

Nesta etapa dos experimentos foram tentados ensaios com o mesmo tipo de fluido intersticial (14,43% de sólidos em volume) com outras

concentrações de sólidos inertes no volume total da mistura, entretanto todas as tentativas feitas fracassaram.

Os problemas ocorridos foram os seguintes: inicialmente foi feito um volume de fluido intersticial no qual seria acrescentado frações de areia. Tal volume, inicialmente previsto, foi insuficiente, pois, devido à alta viscosidade do fluido e tensão crítica, muito material ficava retido no canal e isso provocava problemas na bomba. Dessa forma foi aumentada a quantidade de fluido intersticial e, por conseguinte, de carga , para prosseguir o ensaio.

Com o novo volume pronto a problemática encontrada foi que durante a queda do material no reservatório para a recirculação, ar era naturalmente incorporado, que associado à alta densidade do fluido não conseguia se desprender da mistura, fazendo com que a bomba parasse de trabalhar. Para resolver esse problema a mistura teve que ser mexida no reservatório, constantemente, durante os ensaios, e a bomba elevada.

Por fim, foi adicionado areia na mistura para modificar a concentração de sólidos inertes. A quantidade adicionada de areia modificou a concentração de sólidos inertes para 17,49%, porém essa nova adição de sólidos deixou o fluido muito viscoso de forma que a bomba não foi mais capaz de bombear o fluido, impossibilitando os ensaios.

Pensou-se em utilizar uma nova composição de fluido intersticial, menos viscosa, para a realização dos ensaios, mas os ensaios reométricos, anteriormente mostrados, indicaram que concentrações abaixo de 15% não podiam manter os grãos em suspensão, dessa forma optou-se pela tentativa da realização dos ensaios no canal de 10 m de comprimento.

A II.2 - Ensaios de escoamento em superfície livre no canal residente

Nos ensaios de misturas hiperconcentradas contendo material granular também foi utilizado um Canal Residente no Laboratório de Hidrologia/Hidrometria (conforme descrito no item **MATERIAIS E MÉTODOS**). Optou-se por utilizar a seção do canal na geometria retangular com largura de 60cm. Foi utilizada uma mistura intersticial de água+argila, na concentração de aproximadamente 16% e foram adicionadas frações de areia fina de diâmetro 0,105mm no volume total da mistura formada por água+argila. As misturas ensaiadas estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20: Características das misturas ensaiadas no canal piloto

CV de areia no volume da mistura de água+argila	Densidade da Mistura (kg/m^3)	pH da Mistura
5%	1309,19	5,47
10%	1320,37	5,50
15%	1358,24	5,61

Para cada uma das misturas ensaiadas foram realizados ensaios reométricos para determinar os parâmetros dos fluidos. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Características reométricas das misturas ensaiadas

Mistura	Reograma	τ_c (Pa)	k (Pas^n)	n
5% de areia	1	17,500	0,253	0,642
	2	19,227	0,105	0,759
	3	17,037	0,142	0,718
10% de areia	1	24,687	0,223	0,670
	2	23,739	0,178	0,702
	3	22,570	0,245	0,661
15% de areia	1	24,150	0,254	0,669
	2	24,768	0,169	0,723
	3	24,256	0,173	0,721

Nos ensaios de superfície livre no canal residente foram tomados os seguintes procedimentos: inicialmente foi feita uma mistura intersticial de água+argila com aproximadamente Cv=16%.

A areia adicionada apresentou uma granulometria com diâmetro médio de aproximadamente 0,105mm.

Os ensaios foram realizados na declividade de 3,82º e, para cada uma das misturas, foram realizados ensaios com várias vazões. A determinação da vazão foi feita pelo método volumétrico (era cronometrado o tempo para o enchimento de certo volume pela bomba que alimentava o canal).

Foram medidas as alturas de lâmina normal em 3 pontos do canal. A lâmina utilizada foi a média desses 3 valores. Para a inclinação de 3,82º foram realizados 4 variações de vazões, não se adotou outras declividades devido a ocorrência de Roll Waves no canal (instabilidades que provocam oscilações com comprimento de ondas bem definidos), o que impossibilitou a tomada de lâminas normais e de vazões.

A II.2.1 - Ensaios de escoamento em superfície livre com misturas de água+argila com adição de 5% de areia na mistura intersticial

Para o controle da vazão do conjunto moto-bomba associado ao canal residente utilizou-se um inversor de freqüência, assim, variando-se a rotação do motor variou-se a vazão de escoamento. Para cada uma das rotações foram determinados os erros entre as vazões experimentais (determinadas pelo método volumétrico) e as vazões teóricas (determinadas através da Equação 60). Para as misturas compostas de 5% de areia fina em relação ao fluido intersticial, os valores dos ensaios estão apresentados nas Tabelas 22 a 25.

Tabela 22: Rotação de 480rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,026	0,005227986	0,007638	**46,10**	0,052
	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,026	0,005227986	0,006231	**19,18**	0,052
	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,026	0,005227986	0,006397	**22,36**	0,052
Reograma 2	0,759	17,227	0,2046	1309,19	0,026	0,008326396	0,007638	**9,01**	0,052
	0,759	17,227	0,2046	1309,19	0,026	0,008326396	0,006231	**33,64**	0,052
	0,759	17,227	0,2046	1309,19	0,026	0,008326396	0,006397	**30,16**	0,052
Reograma 3	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,026	0,009480578	0,007638	**24,12**	0,052
	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,026	0,009480578	0,006231	**52,16**	0,052
	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,026	0,009480578	0,006397	**48,20**	0,052

Tabela 23: Rotação de 720rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,0275	0,009890526	0,008721	**13,41**	0,055
	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,0275	0,009890526	0,009259	**6,82**	0,055
	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,0275	0,009890526	0,00899	**10,01**	0,055
Reograma 2	0,759	19,227	0,1046	1309,19	0,0275	0,007630075	0,008721	**14,30**	0,055
	0,759	19,227	0,1046	1309,19	0,0275	0,007630075	0,009259	**21,35**	0,055
	0,759	19,227	0,1046	1309,19	0,0275	0,007630075	0,00899	**17,83**	0,055
Reograma 3	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,0275	0,016515662	0,008721	**89,38**	0,055
	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,0275	0,016515662	0,009259	**78,37**	0,055
	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,0275	0,016515662	0,00899	**83,71**	0,055

Tabela 24: Rotação de 960rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,0285	0,014268038	0,011282	**26,47**	0,057
	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,0285	0,014268038	0,012626	**13,00**	0,057
	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,0285	0,014268038	0,011954	**19,36**	0,057
Reograma 2	0,759	19,227	0,1046	1309,19	0,0285	0,011916796	0,011282	**5,63**	0,057
	0,759	19,227	0,1046	1309,19	0,0285	0,011916796	0,012626	**5,95**	0,057
	0,759	19,227	0,1046	1309,19	0,0285	0,011916796	0,011954	**0,31**	0,057
Reograma 3	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,0285	0,022817136	0,011282	**102,24**	0,057
	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,0285	0,022817136	0,012626	**80,71**	0,057
	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,0285	0,022817136	0,011954	**90,87**	0,057

Tabela 25: Rotação de 1160rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,028	0,011947224	0,01399	**17,09**	0,056
	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,028	0,011947224	0,01381	**15,59**	0,056
	0,642	17,5	0,2525	1309,19	0,028	0,011947224	0,013936	**16,65**	0,056
Reograma 2	0,759	19,227	0,1046	1309,19	0,028	0,009627063	0,01399	**45,32**	0,056
	0,759	19,227	0,1046	1309,19	0,028	0,009627063	0,01381	**43,45**	0,056
	0,759	19,227	0,1046	1309,19	0,028	0,009627063	0,013936	**44,76**	0,056
Reograma 3	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,028	0,019503024	0,01399	**39,41**	0,056
	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,028	0,019503024	0,01381	**41,23**	0,056
	0,718	17,037	0,142	1309,19	0,028	0,019503024	0,013936	**39,95**	0,056

As curvas plotadas dos adimensionais (G-1) x Hb, para valores experimentais e valores teóricos podem ser observados nas Figuras 108, 109 e 110.

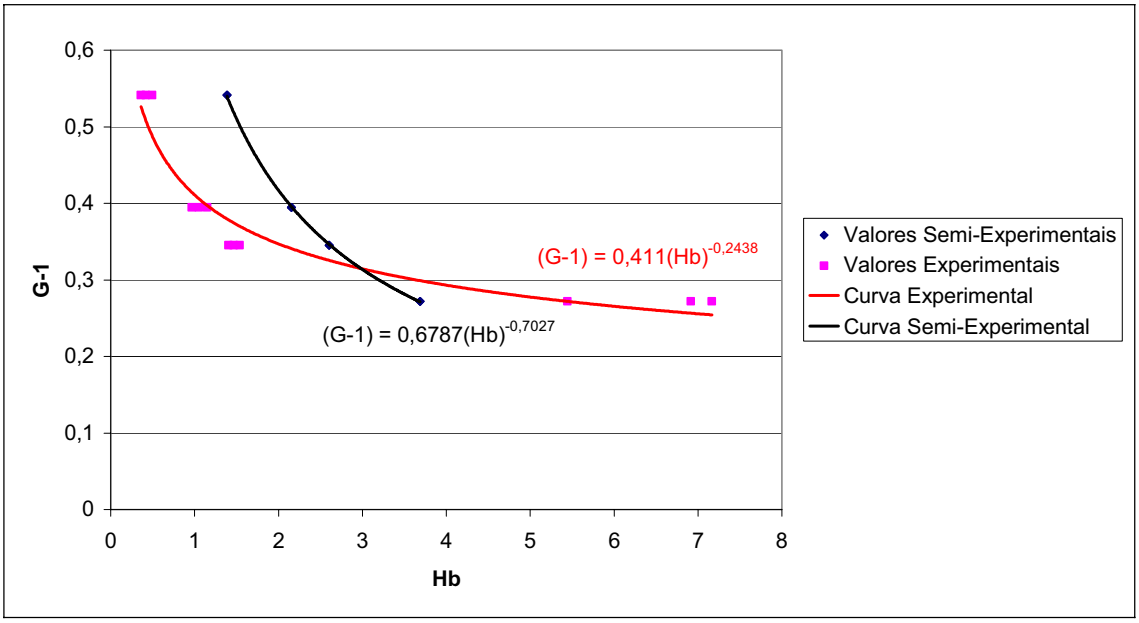


Figura 108: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 1 – 5% de areia

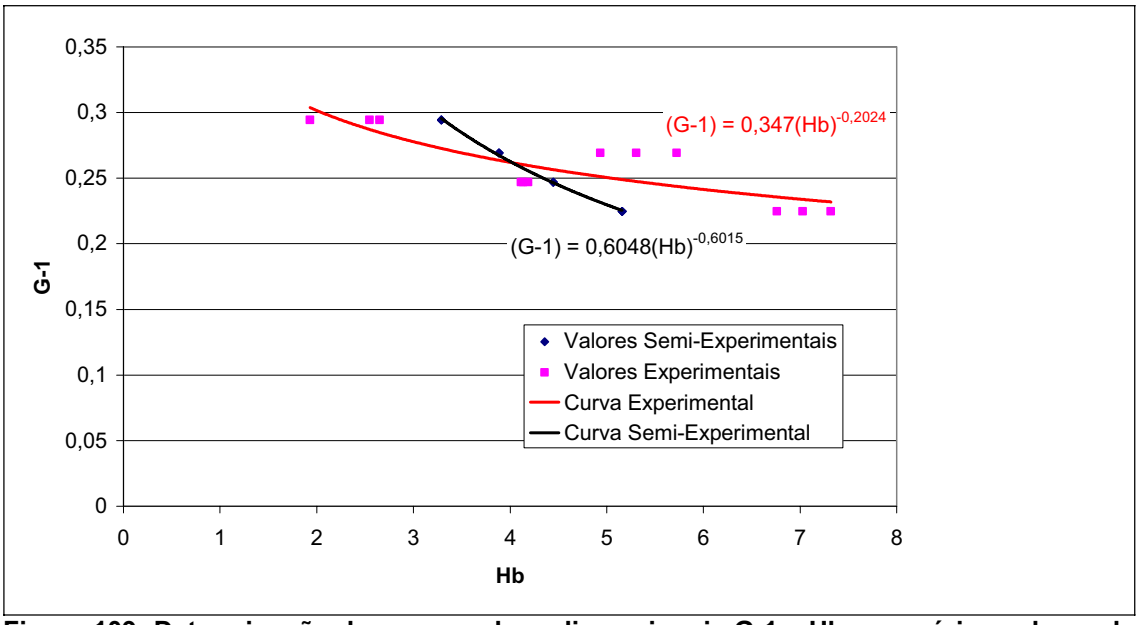


Figura 109: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 2 – 5% de areia

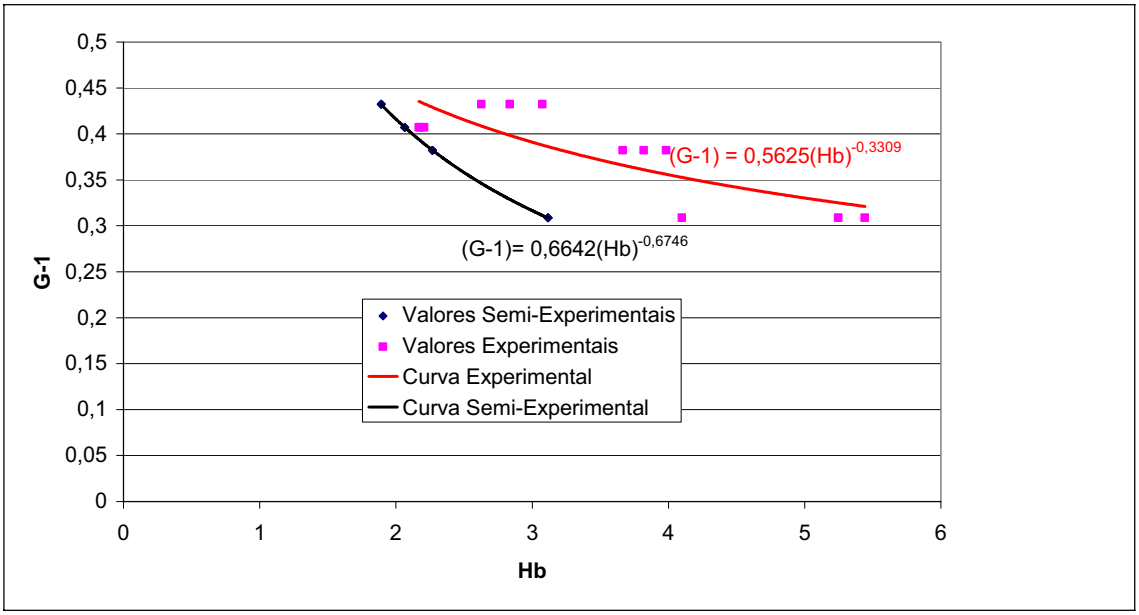


Figura 110: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 3 – 5% de areia

Pode-se notar uma melhor adaptação entre as curvas experimentais e teóricas se comparadas com as curvas dos gráficos de (G-1)x(Hb) obtidas para o canal piloto de 30cm de largura. Essa melhora nos resultados deve ser explicada pelo fato dos escoamentos do canal residente apresentarem a condição de plano infinito, ou seja, a relação Lâmina de escoamento/Largura do canal h/L <<1.

A II.2.2 - Ensaios de escoamento em superfície livre com misturas de água+argila com adição de 10% de areia na mistura intersticial

Após os ensaios de superfície livre com 5% de areia, com relação do volume intersticial de água+argila, foram realizados ensaios de superfície livre com uma nova mistura, agora com 10% de areia no volume total do fluido intersticial. Para as misturas compostas de 10% de areia fina em relação ao fluido intersticial, os valores dos ensaios estão apresentados nas Tabelas 26 a 29.

Tabela 26: Rotação de 480rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,0345	0,008318325	0,0057142	**45,572876**	0,069
	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,0345	0,008318325	0,0060256	**38,049742**	0,069
	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,0345	0,008318325	0,00587	**41,709119**	0,069
Reograma 2	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,0345	0,014271249	0,0057142	**149,7506**	0,069
	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,0345	0,014271249	0,0060256	**136,84362**	0,069
	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,0345	0,014271249	0,00587	**143,12179**	0,069
Reograma 3	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,0345	0,017860398	0,0057142	**212,56165**	0,069
	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,0345	0,017860398	0,0060256	**196,40862**	0,069
	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,0345	0,017860398	0,00587	**204,26572**	0,069

Tabela 27: Rotação de 720rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,035	0,010294807	0,010072	**2,2121401**	0,07
	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,035	0,010294807	0,0093104	**10,573195**	0,07
	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,035	0,010294807	0,0096912	**6,2284005**	0,07
Reograma 2	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,035	0,017050729	0,010072	**69,288416**	0,07
	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,035	0,017050729	0,0093104	**83,136377**	0,07
	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,035	0,017050729	0,0096912	**75,94033**	0,07
Reograma 3	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,035	0,020895401	0,010072	**107,4603**	0,07
	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,035	0,020895401	0,0093104	**124,43076**	0,07
	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,035	0,020895401	0,0096912	**115,61211**	0,07

Tabela 28: Rotação de 960rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,0355	0,012547198	0,0120968	**3,7232828**	0,071
	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,0355	0,012547198	0,011776	**6,5488967**	0,071
	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,0355	0,012547198	0,0119364	**5,1171046**	0,071
Reograma 2	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,0355	0,020150855	0,0120968	**66,580044**	0,071
	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,0355	0,020150855	0,011776	**71,117992**	0,071
	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,0355	0,020150855	0,0119364	**68,818528**	0,071
Reograma 3	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,0355	0,024248219	0,0120968	**100,45152**	0,071
	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,0355	0,024248219	0,011776	**105,91219**	0,071
	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,0355	0,024248219	0,0119364	**103,14516**	0,071

Tabela 29: Rotação de 1160rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,037	0,021124827	0,0139896	**51,003798**	0,074
	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,037	0,021124827	0,0138248	**52,803855**	0,074
	0,67	24,687	0,2229	1320,37	0,037	0,021124827	0,0139072	**51,898494**	0,074
Reograma 2	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,037	0,031534043	0,0139896	**125,41061**	0,074
	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,037	0,031534043	0,0138248	**128,09764**	0,074
	0,702	23,739	0,178	1320,37	0,037	0,031534043	0,0139072	**126,74617**	0,074
Reograma 3	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,037	0,036371208	0,0139896	**159,98748**	0,074
	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,037	0,036371208	0,0138248	**163,08669**	0,074
	0,661	22,57	0,2446	1320,37	0,037	0,036371208	0,0139072	**161,5279**	0,074

As curvas plotadas dos Adimensionais (G-1) x Hb, para valores experimentais e valores teóricos podem ser observados nas Figuras 111, 112 e 113.

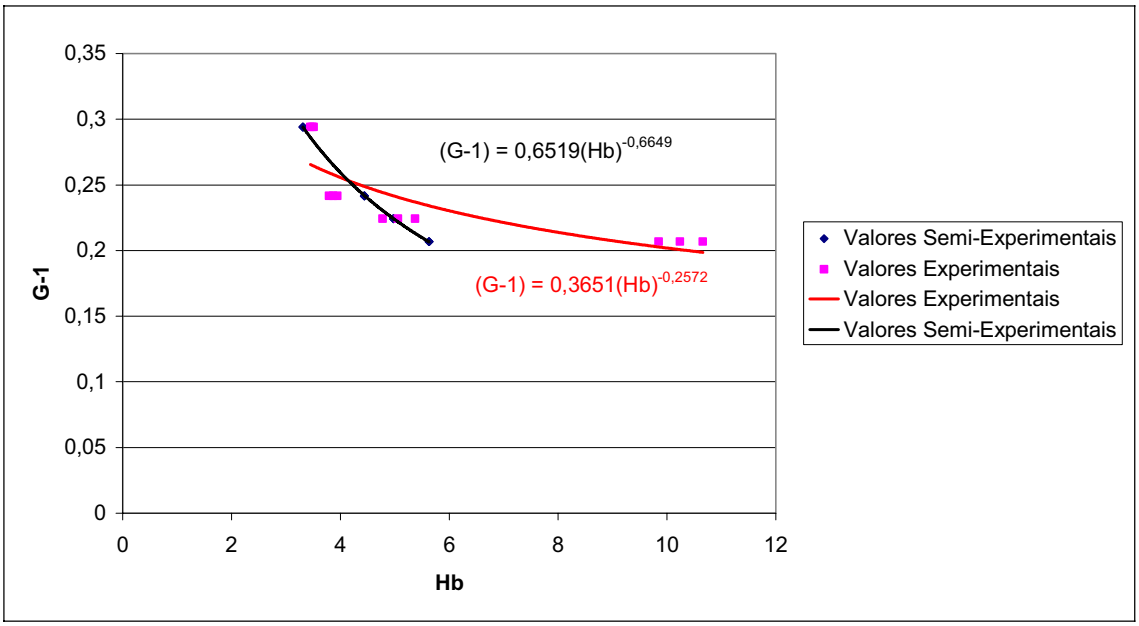


Figura 111: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 1 – 10% de areia

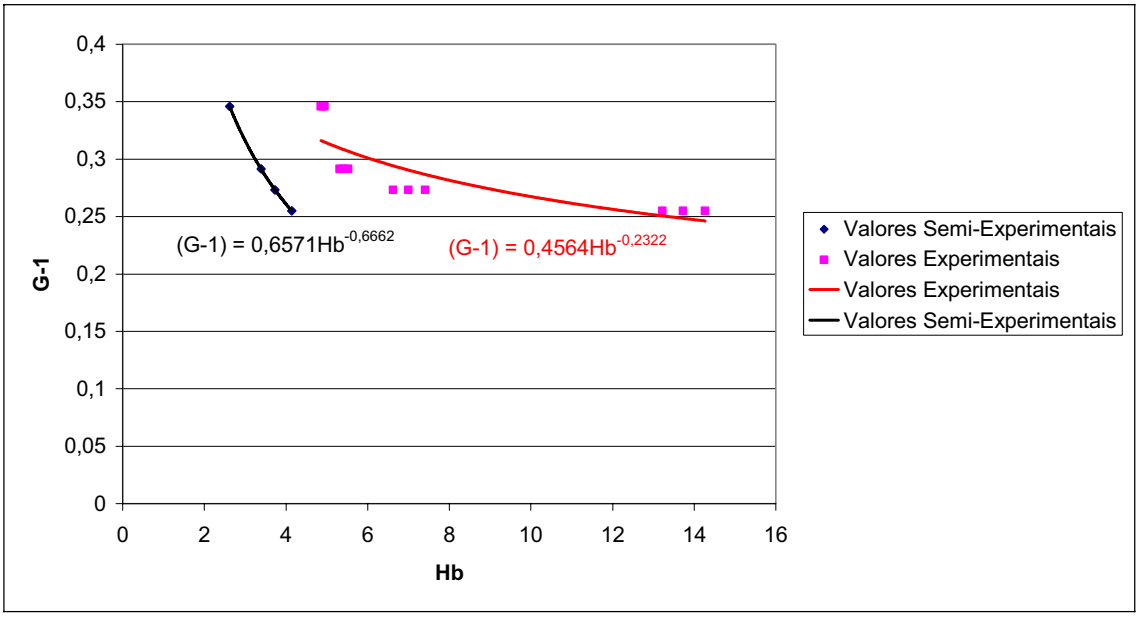


Figura 112: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 2 – 10% de areia

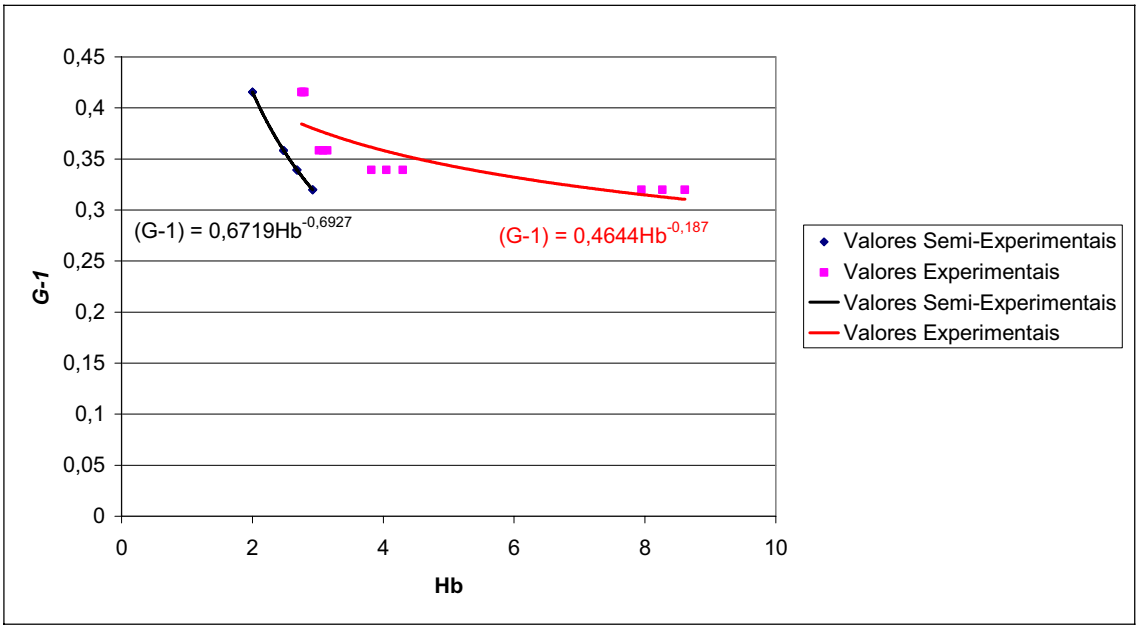


Figura 113: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 3 – 10% de areia

Assim como nos ensaios apresentados no item anterior, observou-se uma aproximação entre as curavas teóricas e experimentais dos gráficos de (G-1)x(Hb).

A II.2.3 - Ensaios de escoamento em superfície livre com misturas de água+argila com adição de 15% de areia na mistura intersticial

Para as misturas compostas de 15% de areia fina em relação ao fluido intersticial, os valores dos ensaios estão apresentados nas Tabelas 30 a 33.

Tabela 30: Rotação de 480rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,033	0,006567886	0,00603	**8,92**	0,066
	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,033	0,006567886	0,00598	**9,83**	0,066
	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,033	0,006567886	0,006005	**9,37**	0,066
Reograma 2	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,033	0,006410444	0,00603	**6,31**	0,066
	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,033	0,006410444	0,00598	**7,2**	0,066
	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,033	0,006410444	0,006005	**6,75**	0,066
Reograma 3	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,033	0,008090587	0,00603	**34,2**	0,066
	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,033	0,008090587	0,00598	**35,3**	0,066
	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,033	0,008090587	0,006005	**34,7**	0,066

Tabela 31: Rotação de 720rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,0345	0,012042079	0,00952	**26,5**	0,069
	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,0345	0,012042079	0,01004	**19,9**	0,069
	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,0345	0,012042079	0,01048	**14,9**	0,069
Reograma 2	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,0345	0,012227096	0,010072	**21,4**	0,069
	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,0345	0,012227096	0,0093104	**31,3**	0,069
	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,0345	0,012227096	0,0096912	**26,2**	0,069
Reograma 3	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,0345	0,014614926	0,010072	**45,1**	0,069
	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,0345	0,014614926	0,0093104	**57**	0,069
	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,0345	0,014614926	0,0096912	**50,8**	0,069

Tabela 32: Rotação de 960rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,0355	0,016943725	0,013076	**29,6**	0,071
	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,0355	0,016943725	0,013156	**28,8**	0,071
	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,0355	0,016943725	0,013116	**29,2**	0,071
Reograma 2	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,0355	0,017470557	0,013076	**33,6**	0,071
	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,0355	0,017470557	0,013156	**32,8**	0,071
	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,0355	0,017470557	0,013116	**33,2**	0,071
Reograma 3	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,0355	0,020373684	0,013076	**55,8**	0,071
	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,0355	0,020373684	0,013156	**54,9**	0,071
	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,0355	0,020373684	0,013116	**55,3**	0,071

Tabela 33: Rotação de 1160rpm Inclinação de 3,82º - Dados de ensaios de superfície livre

	n	tc (Pa)	k (Pa.s^n)	ρ mistura (Kg/m^3)	h (m)	q(teórico) (m^3/s/m)	qexp (m^3/s/m)	erro (%)	h/L
Reograma 1	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,036	0,019812402	0,014116	**40,4**	0,072
	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,036	0,019812402	0,01326	**49,4**	0,072
	0,669	24,15	0,2543	1358,24	0,036	0,019812402	0,013688	**44,7**	0,072
Reograma 2	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,036	0,020544437	0,014116	**45,5**	0,072
	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,036	0,020544437	0,01326	**54,9**	0,072
	0,723	24,768	0,1693	1358,24	0,036	0,020544437	0,013688	**50,1**	0,072
Reograma 3	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,036	0,023717599	0,014116	**68**	0,072
	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,036	0,023717599	0,01326	**78,9**	0,072
	0,721	24,256	0,1725	1358,24	0,036	0,023717599	0,013688	**73,3**	0,072

As curvas plotadas dos Adimensionais (G-1) x Hb, para valores experimentais e valores teóricos podem ser observados nas Figuras 114, 115, 116.

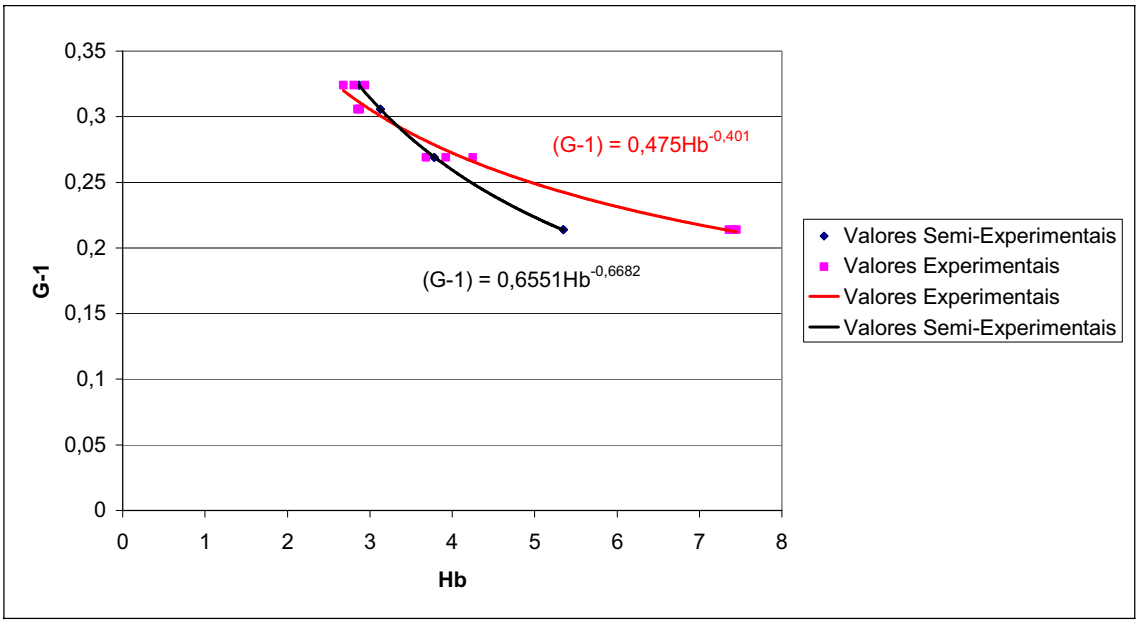


Figura 114: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 1 – 15% de areia

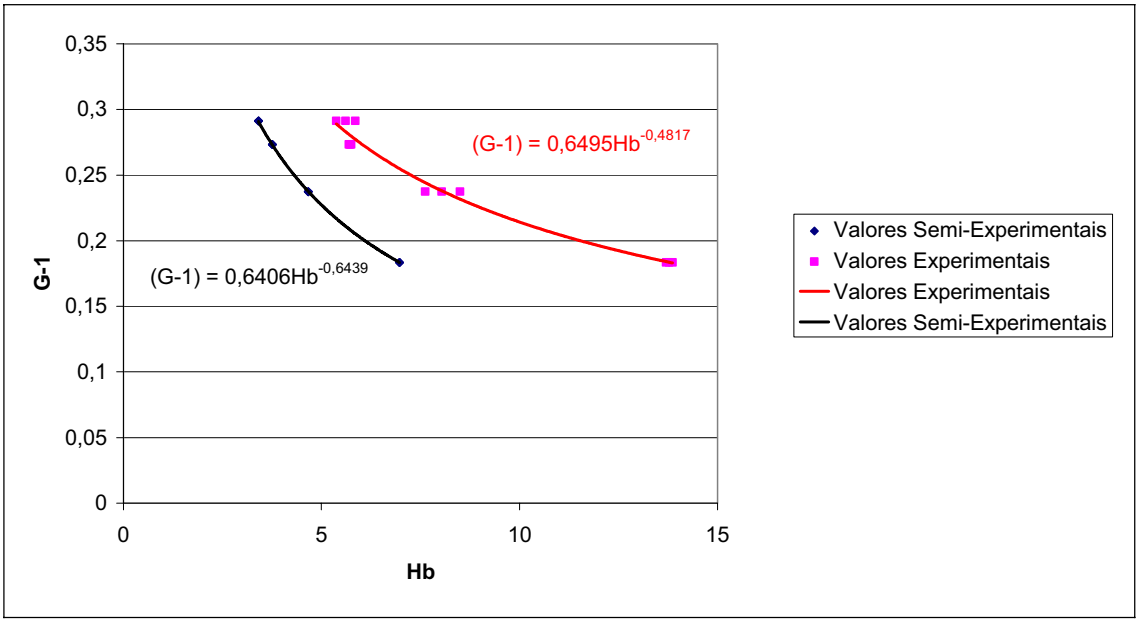


Figura 115: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 2 – 15% de areia

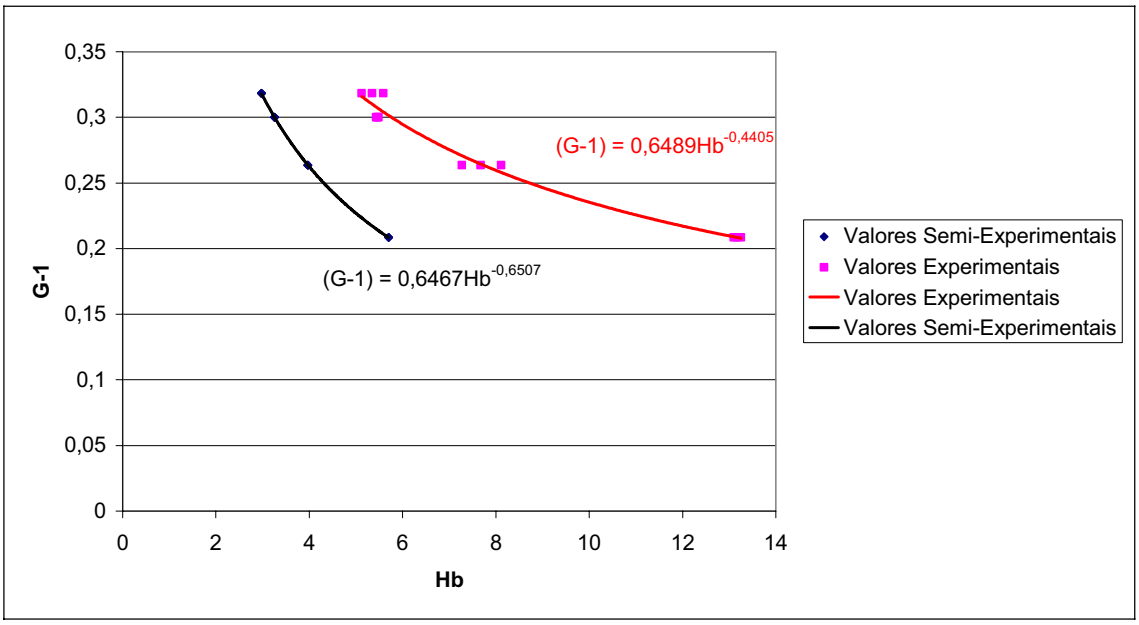


Figura 116: Determinação das curvas dos adimensionais G-1 x Hb para vários valores de Hb (Teóricos e Experimentais) calibrados com os parâmetros reológicos do reograma 3 – 15% de areia

Para esta última bateria de ensaios, também é possível notar uma melhor adaptação entre as curvas experimentais e teóricas se comparadas com as curvas dos gráficos de (G-1)x(Hb) obtidas para o canal piloto de 30cm de largura.

Apesar da aproximação entre as curvas teóricas e experimentais, pode-se observar nas equações ajustadas para cada uma das curvas e, exibidas nos gráficos correspondentes, que a equação $(G-1) = Hb$ deve ser adaptada para

$(G-1) = k_1 H b^{k_2}$, sendo k_1 e $k2$ constantes que devem ser ajustadas experimentalmente em função da geometria do canal (largura da seção transversal e tipo de seção – retangular, trapezoidal, entre outras possíveis).