

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE MISTURAS UTILIZADAS EM SIMULAÇÃO FÍSICA DE
CORRENTES DE TURBIDEZ**

CAMILA CASTRO

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia.*

Orientadora: Prof.^a Ana Luiza de Oliveira Borges
Coorientador: Prof. Rafael Manica

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz A. Magalhães Endres (IPH/UFRGS)
Prof.^a Dr.^a Daniela Guzzon Sanagiotto (IPH/UFRGS)
Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel (UNESP)

Porto Alegre

junho, 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE MISTURAS UTILIZADAS EM SIMULAÇÃO FÍSICA DE
CORRENTES DE TURBIDEZ**

CAMILA CASTRO

Orientadora: Prof.^a Ana Luiza de Oliveira Borges
Coorientador: Prof. Rafael Manica

Porto Alegre

junho, 2016

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que de uma forma ou de outra participaram na realização desse trabalho. Durante a longa jornada que foi esse mestrado muitas pessoas contribuíram comigo e com o projeto. Não foi nada fácil e seria impossível sem vocês.

Agradeço primeiramente à minha família (Elias, Marines e Cândida) por todo amor e incentivo que recebo de vocês.

Sou grata aos meus professores orientadores, Ana e Manica, por toda a paciência que tiveram comigo, por toda a orientação, e correções no texto da dissertação.

Agradeço aos pesquisadores e colegas do Neced, Débora Koller, Patrícia, Richard, Carolina, Farina, Cristian, Cristiano e Eva, pelo aprendizado diário, pelos esclarecimentos e pela convivência.

RESUMO

Devido à grande magnitude com que as correntes de turbidez ocorrem no ambiente natural, a simulação física em escala reduzida tem sido a ferramenta usada pelos pesquisadores para expandir a compreensão do desenvolvimento de tal fenômeno na natureza. O presente trabalho apresenta a caracterização reológica de misturas de água e sedimento que são utilizadas em laboratório na simulação física de correntes de turbidez. O objetivo principal deste trabalho é comparar os dados obtidos via ensaio reológico com as equações reológicas frequentemente usadas para o cálculo da viscosidade. O estudo contemplou o uso de um equipamento específico, o reômetro, para realização da medição das amostras e obtenção de reogramas (relação tensão/taxa de deformação) e o uso de 3 *spindles* diferentes (cone e prato, vane e cilindro concêntrico). Os ensaios foram realizados com uma mistura de água, caulim e/ou carvão em diferentes proporções de sedimentos nas concentrações volumétricas de 5, 10, 15, 20, 25 e 30%. Os resultados experimentais da caracterização reológica ajustaram-se bem aos modelos de Newton e Herschel-Bulkley. Com os resultados também foi possível determinar a máxima fração de empacotamento por meio do método gráfico de Liu (2000), cujos valores encontrados estão consonantes com os mencionados na literatura. Os resultados demonstraram que se deve ter cautela ao se generalizar a utilização de um modelo para prever a viscosidade relativa de suspensões. Por fim, foram propostas duas equações para estimativa da viscosidade relativa em função da concentração volumétrica de cada sedimento, da máxima fração de empacotamento e da porcentagem de argila presente na mistura.

ABSTRACT

Due to the large magnitude that the turbidity currents occur on the natural environment, physical simulation on a small scale has been the tool used by researchers to expand the understanding of the development of such a phenomenon in nature. This paper presents the rheological characterization of mixtures of water and sediment that are used in the laboratory in the physical simulation of turbidity currents. The main objective of this work is to compare the data obtained via rheological test with the rheological equations often used to calculate the viscosity. The study comprises the use of a specific tool, the rheometer, for realization of the measurement of the samples and obtaining of rheograms (shear stress/shear rate) and the use of three different spindles (cone and plate, concentric cylinder and vane). Assays were performed with a mixture of water, kaolin and/or coal in different proportions of sediment in the volumetric concentrations of 5, 10, 15, 20, 25 and 30%. With the results it was also possible to determine the maximum packaging fraction through the graphical method of Liu (2000), whose found values are correspondents with those mentioned in the literature. The results demonstrate that we must be careful to generalize the use of a model to predict the relative viscosity of suspensions. Finally, have been proposed two equations to estimate the relative viscosity due of volumetric concentration of each sediment, the maximum packing fraction and the percentage of clay present in the mixture.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	3
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	3
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	3
2.2.1 Objetivo Principal.....	3
2.2.2 Objetivo Secundário.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 SIMULAÇÃO FÍSICA DE CORRENTES DE TURBIDEZ.....	4
3.2 REOLOGIA DE SUSPENSÃO.....	8
3.3 INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA.....	14
3.4 MÁXIMA FRAÇÃO DE EMPACOTAMENTO.....	16
3.5 CÁLCULO ANALÍTICO DA VISCOSIDADE.....	20
3.6 REOMETRIA.....	26
3.6.1 Reômetro.....	26
3.6.2 A Escolha do <i>Spindle</i>	27
4. MATERIAIS E MÉTODO	31
4.1 SEDIMENTOS E SUAS MISTURAS.....	31
4.2 METODOLOGIA.....	32
4.2.1 Procedimento experimental.....	32
4.2.2 Plano de ensaios executados.....	32
4.2.3 Análise dos dados gerados.....	33
4.2.4 Incertezas experimentais.....	34
5. RESULTADOS	35
5.1 SELEÇÃO DO <i>SPINDLE</i>	35
5.2 SEPARAÇÃO DE FASE.....	38
5.2.1 Sedimentação e ressuspensão das partículas.....	38
5.2.2 Centrifugação.....	41
5.3 REOLOGIA DAS MISTURAS COM 100% DE CAULIM.....	42
5.4 REOLOGIA DAS MISTURAS COM 100% DE CARVÃO.....	44
5.5 REOLOGIA DAS MISTURAS COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE CAULIM E CARVÃO.....	45
5.6 COMPORTAMENTO REOLÓGICO.....	51
6 CÁLCULO DA VISCOSIDADE	54

6.1 DETERMINAÇÃO DA MÁXIMA FRAÇÃO DE EMPACOTAMENTO.....	54
6.2 DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE POR MEIO DAS EQUAÇÕES ANALITIVAS.....	56
6.3 MODELO DE EQUAÇÃO EMPÍRICA PARA ESTIMAR A VISCOSIDADE.....	61
7 DISCUSSÃO.....	74
8 CONCLUSÕES.....	79
8.1 QUANTO AOS OBJETIVOS SECUNDÁRIOS.....	79
8.2 QUANTO AO OBJETIVO PRINCIPAL.....	82
9 RECOMENDAÇÕES.....	83
REFERÊNCIAS.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Foto de uma corrente de turbidez simulada em laboratório.....	4
Figura 2 – Classificação de correntes de alta densidade (fonte: MANICA, 2009).....	5
Figura 3 – Variação da viscosidade aparente em função da taxa de deformação para uma mistura composta de água, caulim e carvão.....	9
Figura 4 – (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do modelo Lei de Potência (fonte: baseado em SCHRAMM, 2006).....	10
Figura 5 – (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do plástico de Bingham (fonte: baseado em SCHRAMM, 2006).....	11
Figura 6 – (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do modelo de Herschel-Bulkley (fonte: baseado em SCHRAMM, 2006).....	12
Figura 7 – Classificação dos fluidos e alguns modelos reológicos (fonte: CHHABRA; RICHARDSON, 2008).....	13
Figura 8 – Viscosidade relativa da suspensão ($1-\mu_r^{-1/2}$) em função da concentração volumétrica (ϕ), adaptado de LIU, 2000.....	20
Figura 9 – Reômetro.....	27
Figura 10 – Diferentes modelos de <i>spindle</i> a) Prato Paralelo b) Cilindro Concêntrico c) Cilindro Concêntrico com Aletas – <i>Vane</i> e d) Cilindro Concêntrico com Copo Invertido – <i>Double Gap</i>	28
Figura 11 – Efeito de sedimentação e centrifugação.....	30
Figura 12 – Distribuição granulométrica.....	31
Figura 13 – Tela de resultados do teste.....	34
Figura 14 – Curvas de fluxo de mistura de água e argila com Cv 30% cisalhada no <i>spindle</i> prato paralelo com diferentes aberturas (h).....	36
Figura 15 – Curvas de viscosidade aparente de uma mistura de água e argila com Cv 30% cisalhada no <i>spindle</i> prato paralelo com diferentes aberturas. (h).....	36
Figura 16 – Efeito da sedimentação e ressuspensão de uma mistura de água e carvão com concentração volumétrica de 5%.....	39
Figura 17 – Curva de viscosidade relativa em função da taxa de cisalhamento de misturas com Cv de 20 e 25% e compostas por 15% caulim e 85% carvão.....	41
Figura 18 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 100% de caulim: a) concentração volumétrica de 5 e 10% b) concentração volumétrica de 15, 20, 25 e 30%.....	42
Figura 19 – Gráfico da viscosidade relativa em função da concentração volumétrica para as misturas com 100% de caulim de Manica (2009) e deste trabalho.....	43
Figura 20 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 100% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10, 15, 20 e 25%; b) concentração volumétrica de 30%.....	44

Figura 21 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 85% de caulim e 15% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10 e 15% b) concentração volumétrica de 20, 25 e 30%	46
Figura 22 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 75% de caulim e 25% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10 e 15% b) concentração volumétrica de 20, 25 e 30%	47
Figura 23 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 50% de caulim e 50% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10 e 15% b) concentração volumétrica de 20, 25 e 30%	48
Figura 24 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 25% de caulim e 75% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10, 15 e 20% b) concentração volumétrica de 25 e 30%	49
Figura 25 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 15% de caulim e 85% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10, 15 e 20% b) concentração volumétrica de 25 e 30%	50
Figura 26 – Dados de viscosidade relativa em função da concentração volumétrica relativo à mistura 50% caulim e 50% esfera de vidro de Manica (2009) e 50% caulim e 50% carvão deste trabalho.....	51
Figura 27 – Gráfico da viscosidade relativa em função da concentração volumétrica para diferentes proporções de caulim e carvão.....	53
Figura 28 – Viscosidade relativa da suspensão ($1-\mu_r^{-1/2}$) em função da concentração volumétrica (ϕ).....	55
Figura 29 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 100% caulim e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica. (linha tracejada em amarelo: variação de $\pm 15\%$ com relação ao modelo de Chong et al. (1971)).....	57
Figura 30 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 85% caulim 15% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica. (linha tracejada em amarelo: variação de $\pm 15\%$ com relação ao modelo de Chong et al. (1971)).....	58
Figura 31 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 75% caulim 25% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica. (linha tracejada em amarelo: variação de $\pm 15\%$ com relação ao modelo de Chong et al. (1971)).....	58
Figura 32 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 50% caulim 50% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica. (linha tracejada em amarelo: variação de $\pm 15\%$ com relação ao modelo de Chong et al. (1971)).....	59
Figura 33 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 25% caulim 75% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica.....	60
Figura 34 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 15% caulim 85% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica.....	60

Figura 35 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 100% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica.....	61
Figura 36 – Viscosidade relativa (μ_r) em função da concentração volumétrica (ϕ) para as misturas com comportamento Newtoniano.....	64
Figura 37 – Viscosidade relativa (μ_r) função do parâmetro ϕ/ϕ_{\max} para as misturas com comportamento não Newtoniano.....	65
Figura 38 – Logaritmo da Viscosidade relativa em função do parâmetro ϕ/ϕ_{\max} para as misturas com comportamento não Newtoniano.....	66
Figura 39 – a) Variação do parâmetro a' em função da % Argila e b) Variação do parâmetro β em função da % Argila.....	67
Figura 40 – Equações propostas neste trabalho para determinar a viscosidade relativa de misturas compostas de caulim e carvão.....	68
Figura 41 – Equações utilizadas para determinar a viscosidade relativa de misturas compostas de caulim + esfera de vidro (MANICA, 2009).....	70
Figura 42 – Dados experimentais da mistura com 100% de caulim (MANICA, 2009) e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica.....	71
Figura 43 – Dados experimentais da mistura com 50% de caulim e 50% de esfera de vidro (MANICA, 2009) e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica.....	72
Figura 44 – Dados experimentais da mistura com 100% de esfera de vidro (MANICA, 2009) e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica.....	73
Figura 45 – Representação da transição de comportamento reológico encontrada neste trabalho (linha pontilhada vermelha) e nos trabalhos de Coussot e Piau (1994), Santos (2003) e Kiryu (2006) (linha tracejada em azul) e no trabalho de Manica (2009) (linha contínua).....	75
Figura 46 – Representação da transição de comportamento reológico encontrada neste trabalho (linha pontilhada vermelha) e no trabalho de Manica (2009) (linha contínua) e valores de máxima fração de empacotamento das misturas compostas com diversas proporções de argila + carvão e argila + esfera de vidro.....	76
Figura 47 – Representação da transição de comportamento reológico encontrada neste trabalho (linha pontilhada vermelha) e nos trabalhos de Coussot e Piau (1994), Santos (2003) e Kiryu (2006) (linha tracejada em azul); identificação do comportamento reológico de uma mistura com 100% carvão e Cvol 40% e 100% areia e Cvol 4,6%.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Máxima fração de empacotamento (ϕ_{\max}) para diversos arranjos de esferas monodispersas (fonte: BARNES, 1993).....	17
Tabela 2 – Valores de fração máxima de empacotamento (ϕ_{\max}) e coeficiente de viscosidade intrínseca [μ] de suspensões com partículas assimétricas, obtidas pelo ajuste de dados experimentais na equação de Krieger-Dougherty (fonte: BARNES, 1993).....	18
Tabela 3 – Modelos de equações para o cálculo da viscosidade relativa.....	25
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens dos diversos <i>spindles</i> e problemas experimentais (adaptado de COUSSOT, 1997).....	29
Tabela 5 – Composição da mistura e concentração volumétrica usada nos ensaios.....	33
Tabela 6 – <i>Spindles</i> escolhidos para as respectivas misturas.....	37
Tabela 7 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 100% de caulim.....	43
Tabela 8 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 100% de carvão.....	45
Tabela 9 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 85% de caulim e 15% de carvão.....	45
Tabela 10 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 75% de caulim e 25% de carvão.....	46
Tabela 11 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 50% de caulim e 50% de carvão.....	47
Tabela 12 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 25% de caulim e 75% de carvão.....	48
Tabela 13 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 15% de caulim e 85% de carvão.....	49
Tabela 14 – Viscosidade relativa (viscosidade dinâmica adimensionalizada pelo valor da água pura) em função da concentração volumétrica e da porcentagem de caulim.....	52
Tabela 15 – Valores de máxima fração de empacotamento (ϕ_{\max}) estimados pelo método de Liu (2000)	55
Tabela 16 – Diferentes modelos para estimar a viscosidade e suas principais aplicações	56
Tabela 17 – Coeficientes linear (a') e angular (β) referente aos dados da figura 35.....	67
Tabela 18 – Valores de viscosidade relativa referente aos dados experimentais: estimado pela fórmula 27 (fundo laranja), fórmula 31 (fundo cinza) e o erro relativo porcentual.....	69
Tabela 19 – Valores de máxima fração de empacotamento (ϕ_{\max}) estimados pelo método de Liu (2000) para diversas proporções de caulim e micro-esfera de vidro.....	71

LISTA DE SÍMBOLOS

a, a', β – coeficientes

A – área da superfície da partícula (m^2)

C_v – concentração volumétrica (%)

d – diâmetro da partícula (mm)

D – diâmetro do *spindle* (mm)

Fr_d – número de Froude densimétrico

g – aceleração da gravidade (m/s^2)

g' – aceleração da gravidade reduzida [m/s^2], dado por $g' = g\Delta\rho/\rho_a - g(\rho_m - \rho_a)/\rho_a$

h – distância entre os pratos/cone e prato (mm)

h' – distância interna entre os cilindros concêntricos (mm)

k_i – constante

k_c – fator de forma, sendo $k_c \approx \pi/4 \approx 1$ para esfera

k_n – índice de consistência (Pas^n)

n – índice de comportamento ou de fluxo

r – raio da partícula (m)

V – volume da partícula (m^3)

V_s – velocidade de sedimentação (m/s)

w – velocidade de queda dos grãos (m/s)

α – ângulo ($^\circ$)

ρ – massa específica do fluido (kg/m^3)

ρ_m – massa específica da mistura (kg/m^3)

ρ_s – massa específica do sedimento (kg/m^3)

ρ_a – massa específica da água (kg/m^3)

ϕ – concentração volumétrica (%)

ϕ_{\max} – máxima fração de empacotamento

ϕ_{ef} – concentração volumétrica efetiva (%)

ϕ_A – concentração volumétrica de argila

ϕ_C – concentração volumétrica de carvão

$\dot{\gamma}$ – taxa de cisalhamento (s^{-1})

$\dot{\gamma}_{\min}$ – taxa de cisalhamento mínima (s^{-1})

μ – coeficiente de viscosidade dinâmico (Pa.s)

μ_a – coeficiente de viscosidade aparente (Pa.s)

μ_p – coeficiente de viscosidade plástica (Pa.s)

μ_r – coeficiente de viscosidade relativa

$[\mu]$ – coeficiente de viscosidade intrínseca (Pa.s)

τ – tensão de cisalhamento (Pa)

τ_0 – tensão de cisalhamento inicial (Pa)

τ_{\min} – tensão de cisalhamento mínima (Pa)

%A – porcentagem de argila

%C – porcentagem de carvão

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos vinculados à sedimentação em águas oceânicas profundas, destaca-se o papel exercido pelas correntes de turbidez, como um dos principais agentes de transporte de sedimentos. Na natureza, as correntes de turbidez são fluxos gerados pela diferença de densidade entre fluidos ocasionada pela presença de sedimentos em suspensão. Esses fluxos apresentam uma grande importância econômica, uma vez que geram rochas de reservatórios de hidrocarbonetos. Sendo assim, estudos que buscam relacionar as características dos fluxos gravitacionais e seus depósitos são estratégicos para a indústria de petróleo, principalmente tratando-se do Brasil, uma vez que muitas reservas de petróleo se encontram em depósitos sedimentares oriundos do transporte de correntes de turbidez.

As correntes de turbidez são fenômenos extremamente complexos e suas propriedades reológicas são resultado da interação entre as partículas em suspensão. A importância da reologia do fluido na classificação dos fluxos gravitacionais foi inicialmente apresentada no trabalho de Dott (1963), em que o autor classifica os fluxos em dois tipos: Newtoniano, como a corrente de turbidez e plástico, como o fluxo de detritos entre outros. Manica (2009) correlacionou as propriedades reológicas de misturas com as propriedades hidrodinâmicas e deposicionais do fluxo, criando, pela primeira vez, uma classificação interligando-as.

Muito da compreensão das correntes de turbidez tem origem na preservação de seus depósitos sedimentares na natureza. Como há poucas observações diretas de correntes de turbidez, os experimentos são a chave para o entendimento de como as condições do fluxo estão aliadas ao tipo de depósito. No Necedo/IPH/UFRGS, há 16 anos, realizam-se simulações físicas de correntes de turbidez em escala reduzida, na qual, para se garantir a semelhança na representação do fenômeno, o carvão mineral é utilizado para representar as frações de areia mais finas, e o caulim, para representar as frações de argila em um escoamento de corrente de turbidez (ÁVILA, 2003; BOFFO, 2010; BRITO, 2005; DEL REY, 2006; DUCKER, 2007; FABIAN, 2002; FICK, 2015; GUIRRO, 2008; MANICA, 2002, 2009; PUHL, 2007, 2012). Brito (2005) afirma que “para que se garanta a eliminação do efeito de escala, devem ser mantidas constantes: a massa específica do sedimento empregado na mistura, as condições de admissão da mesma e também o valor do número de Froude Densimétrico”. Contudo, para conseguir uma mesma massa específica da mistura é necessário aumentar a concentração volumétrica de sedimentos, o que leva a um aumento da quantidade de partículas injetadas e a uma possível mudança de comportamento reológico e, conseqüentemente, a diferentes

mecanismos de transporte e deposição de sedimentos. Alterações nos perfis de velocidade e de concentração, bem como na arquitetura interna dos depósitos, vinculados à viscosidade aparente das misturas também foram evidenciadas no trabalho de Manica (2009).

Assim, o presente trabalho visa dar continuidade às atividades de pesquisa sobre correntes de turbidez e investigará o comportamento reológico de misturas de água e sedimento utilizadas em simulação física, buscando validar o uso das equações utilizadas para estimar a viscosidade das suspensões.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Este capítulo engloba o método de pesquisa adotado no trabalho. Nele está apresentada a questão a ser respondida e a descrição dos objetivos estabelecidos.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: as equações comumente empregadas para avaliar a viscosidade relativa de suspensões podem ser aplicadas para o caso de suspensões granulares como as empregadas na simulação física de correntes de turbidez?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é, para as misturas utilizadas em simulação física de correntes de turbidez, comparar os dados de viscosidade obtidos via ensaio reológico com as estimativas feitas através do uso de modelos (equações) reológicos.

2.2.2 Objetivos secundários

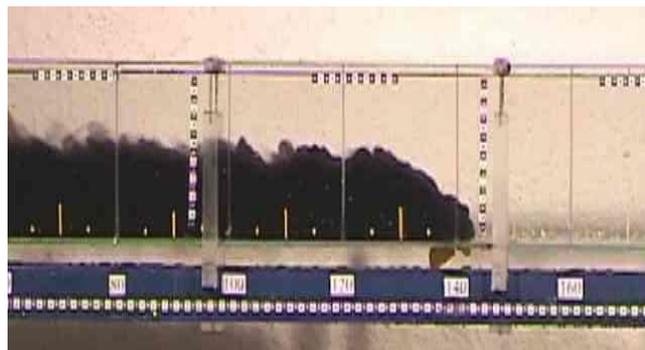
- estabelecer uma metodologia de ensaio para o reômetro C-VO da marca Bolhin adaptada às misturas utilizadas em simulação física de correntes de turbidez;
- formular uma equação reológica que correlacione a viscosidade em função da concentração volumétrica de cada sedimento presente na mistura e a proporção de argila, aplicável aos materiais comumente utilizados nas simulações físicas de correntes de turbidez.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SIMULAÇÃO FÍSICA DE CORRENTES DE TURBIDEZ

Uma corrente de turbidez é descrita como o fluxo de uma massa fluida que se desloca no interior de um fluido ambiente, cuja força motriz desse deslocamento se deve à diferença de massas específicas entre a corrente e o ambiente. No caso das correntes de turbidez, essa diferença de massas específicas é resultado da variação da presença de sólidos suspensos e/ou dissolvidos que são transportados pelo escoamento (KNELLER & BUCKEE, 2000) (figura 1). Sendo a diferença de densidade entre os fluidos aquilo que propulsiona o deslocamento da corrente, a viscosidade e a concentração de partículas causam diversos efeitos no mecanismo de transporte e deposição dos sedimentos. Devido à imensa dificuldade de monitorar os fluxos no seu ambiente natural, muito do entendimento desse escoamento vem da análise/interpretação dos seus depósitos sedimentares preservados em afloramentos de rochas e no fundo oceânico. Por essa razão, a escassez de monitoramento direto garante que os experimentos em laboratório desempenhem um papel fundamental para se inferir as características do fluxo, sua evolução e o depósito gerado.

Figura 1 – Foto de uma corrente de turbidez simulada em laboratório (fonte: Necod)

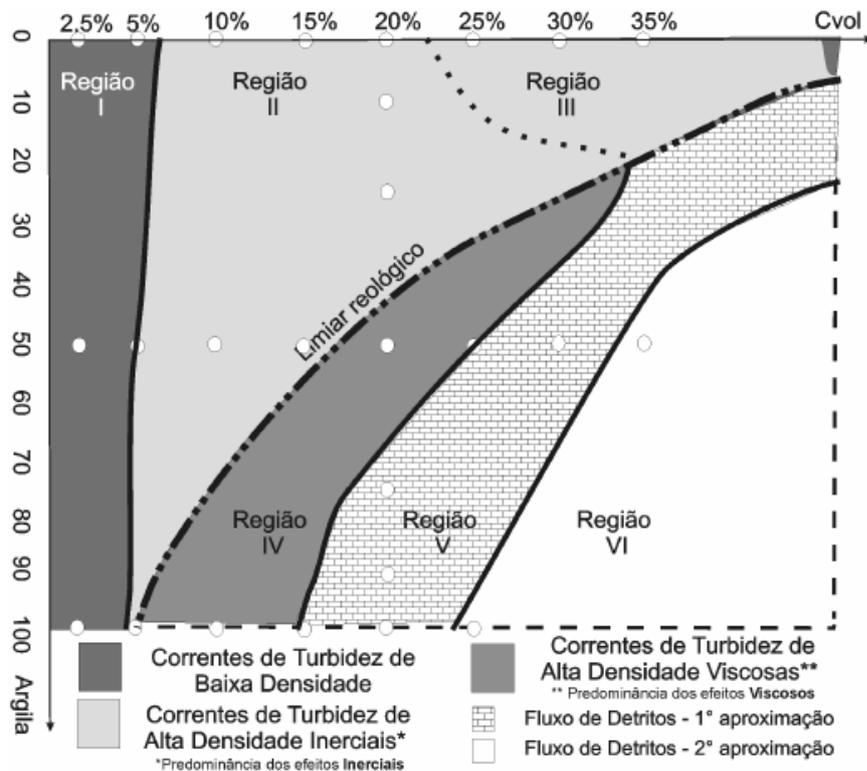


Sob o olhar da reologia – ciência que estuda a deformação e o escoamento de corpos sólidos ou fluidos (gases ou líquidos) – os fluxos podem ser subdivididos em Newtonianos (relação linear entre a tensão de deformação e a taxa de cisalhamento) e não Newtonianos (relação não linear), podendo apresentar, ou não, tensão de cisalhamento inicial. Como as correntes de turbidez são compostas por materiais coesivos (argila) e não coesivos (areia), que possuem propriedades

físicas distintas, a quantidade de argila, ou seja, de redes de ligações coloidais, influenciam a interação entre as partículas e, conseqüentemente, a estrutura do fluxo e como ele se movimenta. Dott (1963) foi o primeiro a reconhecer a importância da reologia na classificação dos fluxos gravitacionais.

Atualmente, não há consenso quanto à classificação das correntes de alta densidade, ou seja, aquelas que contem grande concentração de sedimentos. Manica (2009) propôs uma nova classificação das correntes de turbidez de alta densidade ao considerar as propriedades reológicas, a concentração do material coesivo e a presença de argila. Para as simulações por ele realizadas, foram utilizadas misturas com micro-esferas de vidro (ballotini) e caulim com diferentes concentrações e proporções dos materiais. As concentrações de sedimentos empregadas foram de 2,5, 5, 10, 15, 20, 25, e 30% em volume. Para a concentração de 20%, foram empregadas diferentes proporções de ballotini e caulim, a saber: 0:100, 10:90, 75:25, 50:50, 25:75, 90:10, 0:100. Na figura 2 é apresentada a nova classificação proposta pelo autor em que foram definidas 6 regiões que correlacionam a reologia, fluxo e depósito, que apresentam uma condição de causa (fluxo) com consequência (depósito) características.

Figura 2 – Classificação de correntes de alta densidade (fonte: MANICA, 2009)



Segundo Kneller (2000), os experimentos em laboratório em escala reduzida ainda oferecem os melhores meios para estudar a complexa dinâmica de uma corrente de sedimentos em suspensão. Mesmo os modelos matemáticos, que também podem trazer esclarecimento ao problema, necessitam dos resultados experimentais, os quais proporcionam um meio de restringir algumas das variáveis existentes nos modelos numéricos. A utilização de modelos físicos em escala reduzida implica que estes sejam semelhantes ao protótipo, afim de que os resultados gerados em laboratório possam ser utilizados nos estudos de casos reais. A análise dimensional de um fenômeno físico consiste em escolher as grandezas que são mais influentes no fenômeno e agrupar essas grandezas de forma que as mesmas sejam relacionadas de maneira a constituir números adimensionais. Os números adimensionais que melhor caracterizam uma corrente de turbidez, são os números de Froude e de Reynolds. Todavia, é impossível conseguir uma igualdade de valores entre o modelo e o protótipo simultaneamente para os dois parâmetros. A semelhança do número de Froude é utilizada apenas para fluxos totalmente turbulentos, em que o número de Reynolds do fluxo tenha valores maiores do que 2000 (Middleton, 1966a; Kneller & Buckee, 2000). É muito comum o uso do número de Froude densimétrico (fórmula 1) que relaciona as forças inerciais e gravitacionais que estão envolvidas no fenômeno.

$$Fr_d = \frac{v}{\sqrt{g' \cdot h}} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

Fr_d = número de Froude densimétrico;

v = velocidade média da corrente (m/s);

g' = aceleração da gravidade reduzida [m/s^2], dado por $g' = g \Delta \rho / \rho_a = g(\rho_m - \rho_a) / \rho_a$;

ρ_m = massa específica da mistura (kg/m^3);

ρ_a = massa específica do fluido ambiente (kg/m^3);

h = espessura média da corrente (m).

Middleton, (1966a) e Kneller (2000) citam a relação entre a velocidade de queda e a velocidade média da corrente como um parâmetro adimensional possível de ser usado. A velocidade de queda da partícula deve ser dimensionada proporcionalmente à escala da velocidade média da corrente (fórmula 2). Par isso, a velocidade de queda da partícula deve ser adequadamente reduzida em escala e a solução deve ser o uso de um sedimento com menor diâmetro e/ou com menor densidade.

$$\left(\frac{w}{v}\right)_{\text{protótipo}} = \left(\frac{w}{v}\right)_{\text{modelo}} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

w = velocidade de queda dos grãos (m/s);

v = velocidade média da corrente (m/s).

Middetlon (1966b) afirma que os melhores sedimentos para serem usados em simulação física são os que apresentam uma densidade menor que a dos sedimentos presentes nas misturas naturais. Contudo, o autor comenta (1966a) que a concentração de sedimentos ou o tamanho dos grãos afetam o comportamento das partículas em uma mistura, gerando uma condição que pode não estar mais em escala com todo o comportamento da corrente.

Brito (2005) estudou os efeitos da escala de simulação sobre os padrões deposicionais de correntes de turbidez e observou acerca dos depósitos e da hidrodinâmica do escoamento, que, “para que se garanta a eliminação do efeito de escala, devem ser mantidas constantes: a massa específica do sedimento empregado na mistura, as condições de admissão da mesma e também o valor do número de Froude Densimétrico”. Como a massa específica utilizada no modelo (carvão) é menor que a do protótipo (areia), para conseguir uma mesma massa específica da mistura é necessário aumentar a concentração volumétrica de sedimentos, o que leva a um aumento da quantidade de partículas injetadas e a uma possível mudança de comportamento reológico e, conseqüentemente, a diferentes mecanismos de transporte e deposição de sedimentos.

3.2 REOLOGIA DE SUSPENSÃO

Descrever o comportamento mecânico da matéria, ou seja, como um sólido se deforma, ou como um fluido escoar quando submetidos a forças externas, é o objetivo do estudo da reologia. Do ponto de vista matemático, o comportamento reológico do material pode ser descrito por meio de uma equação constitutiva, a qual reflete seu comportamento mecânico em termos da relação entre a tensão de deformação e a taxa de cisalhamento. Deve-se a Isaac Newton (COUSSOT, 1997) a definição da resistência ao escoamento de um fluido (**denominada coeficiente de viscosidade dinâmico – μ**) e a elaboração da primeira lei básica da reologia que descreve o comportamento de um fluido (fórmula 3).

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

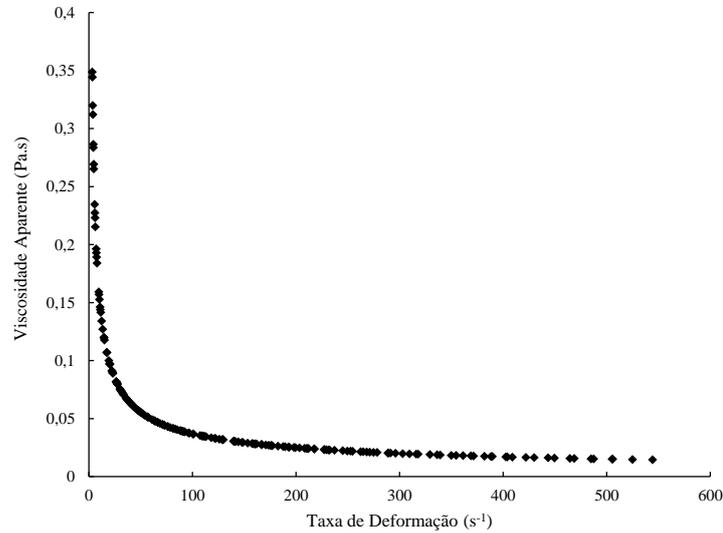
τ = tensão de cisalhamento (Pa);

μ = coeficiente de viscosidade dinâmico (Pa.s);

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (s^{-1}).

Em termos gerais, quanto maior a viscosidade de um fluido, maior a resistência para ele fluir. Os fluidos conhecidos como **Newtonianos** apresentam um comportamento linear, ou seja, uma proporcionalidade entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento, apresentando uma viscosidade única e constante. No entanto, muitas substâncias de natureza multifásica (emulsões, espumas, suspensões, dispersões, pastas, por exemplo) não se adaptam ao postulado Newtoniano, sendo conhecidas por uma variedade de designações, tais como, fluidos **não Newtonianos**, fluidos complexos, fluidos não lineares ou fluidos reologicamente complexos (DESHPANDE et al., 2010). Para essas substâncias, a viscosidade não é única e varia conforme a magnitude da taxa de cisalhamento (figura 3), por essa razão, usa-se o termo **coeficiente de viscosidade aparente (μ_a)**, o qual representa a viscosidade que um fluido teria, quando submetido a uma certa condição de fluxo, se fosse Newtoniano (fórmula 4).

Figura 3 – Variação da viscosidade aparente em função da taxa de deformação para uma mistura composta de água, caulim e carvão



$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

μ_a = coeficiente de viscosidade aparente (Pa.s);

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (s⁻¹);

τ = tensão de cisalhamento (Pa).

A viscosidade dos fluidos não Newtonianos ainda pode ser classificada como sendo dependente ou não do tempo. Quando a viscosidade decresce com o tempo, enquanto que o fluido é submetido a uma tensão de cisalhamento constante, o material apresenta **tixotropia**. Por outro lado, se a viscosidade aumenta com o tempo, sob uma tensão de cisalhamento constante, o fluido apresenta **tixotropia negativa**. O tipo mais comum de fluido não Newtoniano independente do tempo é chamado de fluido pseudoplástico ou dilatante, cujo modelo reológico mais comumente encontrado na literatura é o modelo de **Ostwald – de**

Walle, conhecido como **Lei de Potência**. Seu modelo matemático é dado pela fórmula 5 (OSTWALD, 1925; DE WAALE, 1923):

$$\tau = k_n \cdot (\dot{\gamma})^n \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

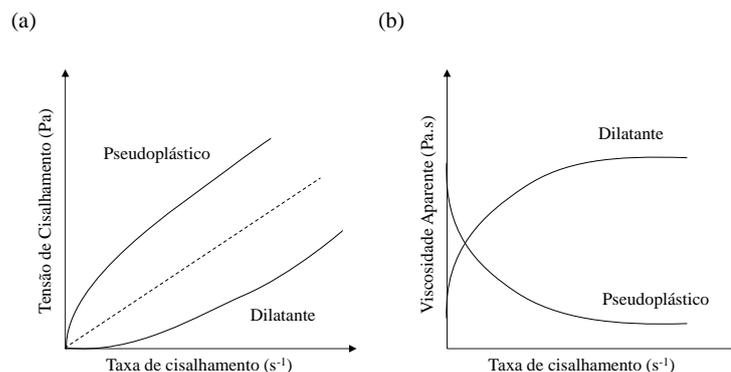
k_n = índice de consistência (Pa.sⁿ);

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (s⁻¹);

n = índice de comportamento ou de fluxo.

Quando **n** – que é uma grandeza adimensional – assumir valores menores do que um e maiores do que zero, o fluido em questão é chamado de **pseudoplástico** e sua viscosidade decresce rapidamente quando a taxa de cisalhamento passa de níveis mais baixos para níveis mais altos. Se o valor de n for maior que um, o fluido é chamado de **dilatante**, o qual, ao contrário do fluido pseudoplástico, apresenta um crescimento na viscosidade com o acréscimo da taxa de cisalhamento. Nota-se, pela figura 4, que o **n** indica o afastamento do comportamento do fluido com relação ao modelo Newtoniano, que se comportará dessa forma quando **n** for igual a um (FOX; MACDONALD, 2001).

Figura 4 – (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do modelo Lei de Potência (fonte: baseado em SCHRAMM, 2006)



Os materiais que se comportam conforme o **Modelo de Bingham** são denominados de plásticos de Bingham. Estes fluidos possuem uma resistência inicial que os impedem de fluir, logo, para que ocorra uma deformação, é necessária a aplicação de uma tensão mínima denominada **tensão de cisalhamento inicial** (τ_0). A equação matemática que define o plástico de Bingham é expressa por (fórmula 6) (BINGHAM, 1922):

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

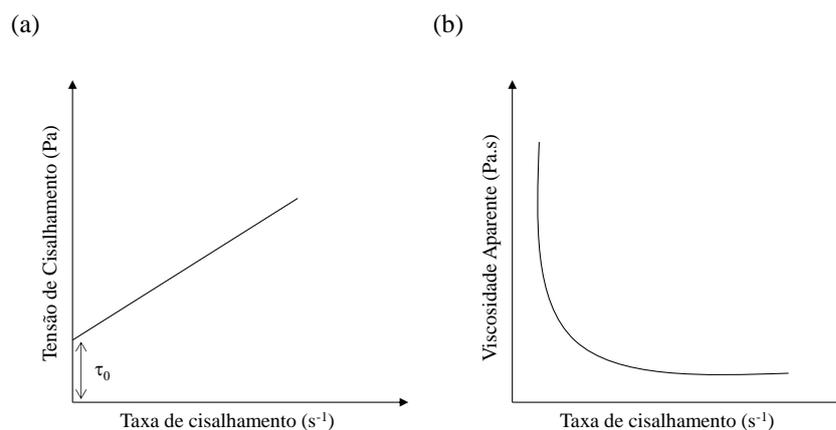
τ_0 = tensão de cisalhamento inicial (Pa);

μ_p = viscosidade plástica (Pa.s);

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (s^{-1}).

O reograma e a curva de viscosidade do Modelo de Bingham são mostrados na figura 5.

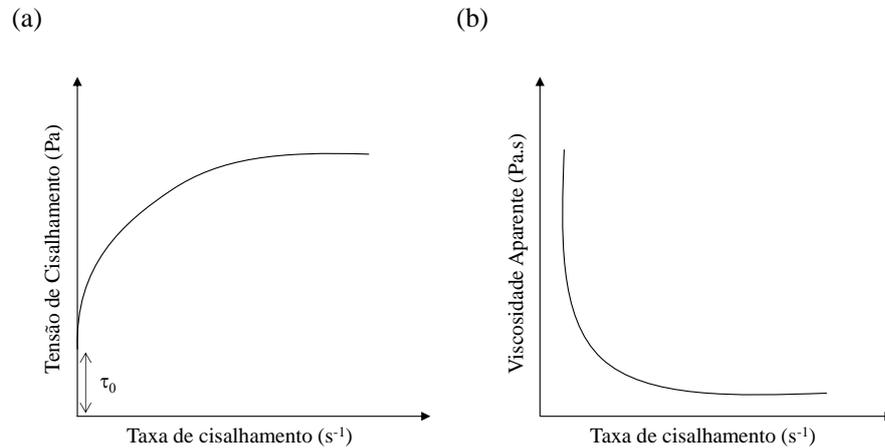
Figura 5– (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do plástico de Bingham (fonte: baseado em SCHRAMM, 2006)



O **modelo de Herschell-Bulkley** descreve o comportamento dos fluidos **plásticos** e é uma extensão do modelo de potência com o acréscimo de um novo parâmetro, a tensão de

cisalhamento inicial (τ_0). As respectivas curvas de fluxo e de viscosidade são mostradas na figura 6.

Figura 6 – (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do modelo de Herschel-Bulkley
(fonte: baseado em SCHRAMM, 2006)



O modelo matemático de Herschel-Bulkley é mostrado na fórmula 7 (HERSCHEL E BULKLEY, 1926):

$$\tau = \tau_0 + k_n \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 = tensão de cisalhamento inicial (Pa);

k_n = índice de consistência (Pa.sⁿ);

n = índice de comportamento ou de fluxo;

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (s⁻¹).

Da mesma forma que o modelo de Herschel-Bulkley, o **modelo de Casson** apresenta características plásticas. Seu modelo é apresentado na fórmula 8

(fórmula 8)

$$\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + (\mu_c \cdot \dot{\gamma})^{0,5}$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

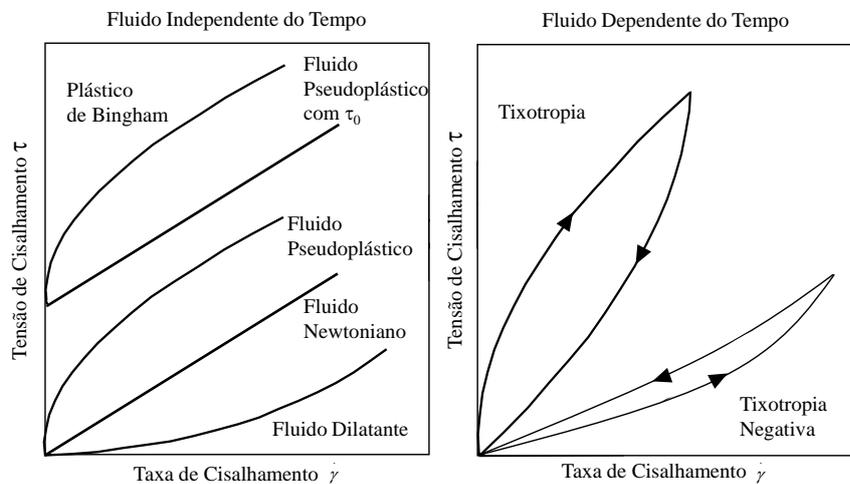
τ_0 = tensão de cisalhamento inicial (Pa);

μ_c = coeficiente de viscosidade plástica de Casson (Pa.s);

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (s⁻¹).

Na figura 7 são representados os comportamentos de um fluido dependente ou não do tempo e as equações anteriormente citadas.

Figura 7 – Classificação dos fluidos e alguns modelos reológicos (fonte: CHHABRA; RICHARDSON, 2008)



$\tau = \tau_o + \mu_p \dot{\gamma}$	(Bingham, 1922)
$\tau = \tau_o + k_n \dot{\gamma}^n$	(Herschel e Bulkley, 1926)
$\tau = k_n (\dot{\gamma})^n$	(Ostwald, 1925; De Waale, 1923)
$\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + (\mu_c \dot{\gamma})^{0,5}$	(Casson, 1959)

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 = tensão de cisalhamento inicial (Pa);

μ_p = coeficiente de viscosidade plástica (Pa.s);

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (s^{-1});

k_n = índice de consistência (Pa.sⁿ);

n = índice de comportamento ou de fluxo;

μ_c = coeficiente de viscosidade plástica de Casson (Pa.s).

3.3 INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA

Em suspensões, a capacidade de resistir à ação do escoamento (viscosidade de uma suspensão) pode ser alterada conforme a intensidade da interação entre as partículas, a qual pode variar com o tempo e com as características do fluxo. A prática corrente para estimar a viscosidade de suspensões é calculá-la por meio de leis que consideram a variabilidade da concentração volumétrica dos componentes das misturas. A concentração volumétrica de sólidos é definida como a relação entre o volume de partículas sólidas pelo volume total da mistura, podendo ser determinada a partir das massas específicas da mistura composta de água e sedimento, da água e do sedimento (fórmula 9).

$$C_v = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_s - \rho_a} \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

C_v = concentração volumétrica (%);

ρ_m = massa específica da mistura (kg/m^3);

ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m^3);

ρ_a = massa específica da água (kg/m^3).

Dependendo da concentração volumétrica de sólidos, as suspensões podem ser classificadas em três grupos: diluída, concentrada e altamente concentrada (TROPEAL et al., 2007). Suspensões diluídas de partículas esféricas, isto é, suspensões com uma concentração volumétrica de sedimentos muito baixa, apresentam um comportamento Newtoniano. Neste caso as distâncias entre as partículas são suficientemente grandes, de modo que o movimento Browniano das partículas (difusão das partículas no interior do líquido) predomina sobre o efeito das interações interpartículas para suspensões coloidais. Einstein (1911) foi o primeiro que investigou as forças hidrodinâmicas que resultam do movimento da fase contínua (fluido Newtoniano) no que diz respeito à não interação com as partículas esféricas rígidas. Desse estudo o autor derivou a fórmula 10 para a viscosidade de suspensões altamente diluídas, onde μ_r é chamado de **viscosidade relativa**, que é uma adimensionalização da viscosidade da suspensão (μ) pela viscosidade de outro fluido usado como referência (tendo a viscosidade da água pura $\mu_0 = 10^{-3}$ Pa.s à 20°C, usado como valor de referência neste trabalho), $k_1 = 5/2 = 2,5$ é conhecido como o coeficiente de Einstein e ϕ é a concentração volumétrica. A ordem de aproximação é indicada pelo símbolo $O(\)$.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + k_1 \cdot \phi + O(\phi^2) \quad (\text{fórmula 10})$$

A generalização do coeficiente de Einstein é denominada **viscosidade intrínseca** $[\mu]$ e é definida conforme a fórmula 11.

$$[\mu] = \lim_{\phi \rightarrow 0} \frac{\mu_r - 1}{\phi} \quad (\text{fórmula 11})$$

O aumento da concentração volumétrica e conseqüente transição de uma suspensão diluída para uma suspensão concentrada, causa um aumento das interações hidrodinâmicas entre as partículas da mistura. A interação entre duas ou mais partículas foi descrita por Batchelor e Green (1972) na qual a fórmula de Einstein (fórmula 10) foi expandida para ser válida para concentrações volumétricas mais altas (2% a 10%) (fórmula 12)

$$\mu_r = 1 + k_1 \cdot \phi + k_2 \cdot \phi^2 + O(\phi^3) \quad (\text{fórmula 12})$$

Nessa fórmula, o coeficiente k_2 descreve o afastamento do limite da suspensão diluída e tem o valor de 5,2. Esse tipo de série de potência pode ser resumida em uma equação geral que relaciona a viscosidade relativa em função da concentração volumétrica com um coeficiente de expansão k_i (fórmula 13)

$$\mu_r = \sum_{i=0}^N k_i \cdot \phi^i \quad (\text{fórmula 13})$$

Para altas concentrações volumétricas, onde as forças hidrodinâmicas e de superfície, bem como as inúmeras interações entre as partículas torna-se relevantes, a expansão da série de potência falha, visto que a viscosidade tende ao infinito e a concentração volumétrica se aproxima do valor da máxima fração de empacotamento.

3.4 MÁXIMA FRAÇÃO DE EMPACOTAMENTO

À medida que mais partículas são adicionadas em uma suspensão, começa a surgir um “congestionamento” dentro da mesma, ou seja, ocorre um aumento do contato das partículas, tornando o fluxo impossível, ou, melhor dizendo, fazendo a viscosidade tender ao infinito. Essa fase ocorre quando a concentração volumétrica se aproxima da máxima fração de empacotamento (ϕ_{\max}). A interpretação do conceito da máxima fração de empacotamento tem variado com o tempo e com as circunstâncias em que é aplicado. Inicialmente foi definida apenas como uma constante geométrica, sendo calculada pelo tipo de arranjo das partículas, cujo valor varia com a forma e a distribuição das mesmas (ZHOU et al., 1995). Na tabela 1 se pode notar a variação de 0,5 - 0,7 da máxima fração de empacotamento para diversos arranjos de esferas monodispersas (BARNES et al., 1993). Segundo Wildemuth e Williams (1984 apud ZHOU et al, 1995), a máxima fração de empacotamento é considerada como uma variável correspondente a um determinado conjunto de partículas sob determinadas condições

de fluxo. Atualmente, pode-se dizer que a máxima fração de empacotamento é um valor escalar que depende principalmente da distribuição do tamanho da partícula, da forma da partícula, dos tipos de interações entre a fase contínua (fluido newtoniano) e a fase dispersa (partículas) e da intensidade de cisalhamento (TROPEAL et al., 2007).

Tabela 1 – Máxima fração de empacotamento (ϕ_{\max}) para diversos arranjos de esferas monodispersas (fonte: BARNES, 1993)

Arranjo	ϕ_{\max}
Cúbico simples	0,520
Hexagonal compacto	0,605
Aleatório compacto	0,637
Cúbico de corpo centrado	0,680
Hexagonal/cúbico de face centrada	0,740

Uma distribuição granulométrica mal selecionada, ou seja, com diferentes tamanhos de grãos presentes, apresenta valores maiores de máxima fração de empacotamento, pois as partículas menores podem se posicionar no intervalo entre as maiores. Por outro lado, partículas não esféricas conduzem a uma menor ocupação dos espaços e, conseqüentemente, a um valor menor de máxima fração de empacotamento.

A tabela 2 apresenta os valores de coeficiente de viscosidade intrínseca [μ] e da fração máxima de empacotamento (ϕ_{\max}) de suspensões com partículas assimétricas, usando a equação de Krieger e Dougherty (1959) (fórmula 14) para diferentes materiais empregados em experimentos (BARNES, 1993). Percebe-se uma tendência de aumento do coeficiente de viscosidade intrínseca [μ] e diminuição da fração máxima de empacotamento (ϕ_{\max}) com o aumento da assimetria da forma das partículas.

Tabela 2 – Valores de fração máxima de empacotamento (ϕ_{\max}) e coeficiente de viscosidade intrínseca $[\mu]$ de suspensões com partículas assimétricas, obtidas pelo ajuste de dados experimentais na equação de Krieger e Dougherty (1959) (fonte: BARNES, 1993)

Sistema	ϕ_{\max}	$[\mu]$	$\phi_{\max}[\mu]$
Fibra de vidro (l/d=21)	0,233	6,00	1,40
Fibra de vidro (l/d=14)	0,260	5,03	1,31
Varetas de vidro (30x700 μm)	0,268	9,25	2,48
Laterita	0,350	9,00	3,25
Grãos de quartzo (53-76 μm)	0,371	5,80	2,15
Fibra de vidro (l/d=7)	0,374	3,80	1,42
Placas de vidro (100x400 μm)	0,382	9,87	3,77
Dióxido de Titânio	0,550	5,00	2,77
Gesso	0,690	3,25	2,24
Esfera de vidro	0,650	3,11	2,02

l/d = comprimento/diâmetro

$$\mu_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)^{-[\mu] \cdot \phi_{\max}} \quad (\text{fórmula 14})$$

Onde:

μ_r = coeficiente de viscosidade relativa;

ϕ = concentração volumétrica (%);

ϕ_{\max} = máxima fração de empacotamento;

$[\mu]$ = coeficiente de viscosidade intrínseca (Pa.s).

Segundo Zhou et al. (1995), a determinação do valor da máxima fração de empacotamento pode ser obtida por meio de cálculo analítico, por meio de extrapolação de dados experimentais de reômetros ou pelo método de sedimentação e centrifugação. Para o autor, é irreal imaginar que a máxima fração de empacotamento de uma suspensão concentrada possa ser avaliada por meio de cálculos analíticos que considerem apenas as propriedades de arranjo das partículas. O método que usa a extrapolação de dados experimentais de reômetros depende principalmente da capacidade do equipamento em medir altos valores de coeficiente

de viscosidade relativa e da capacidade do operador em prevenir possíveis erros experimentais. Por fim, o valor de máxima fração de empacotamento obtido pelo método de sedimentação ou centrifugação, representa apenas um tipo de arranjo, uma vez que o método não leva em conta os efeitos devido aos diversos estados de agregação das partículas.

Um exemplo do método de extrapolação dos dados é o modelo proposto por Liu (2000), que apresenta uma maneira simples para a determinação da máxima fração de empacotamento. O autor verificou, para suspensões cerâmicas, que a relação do coeficiente de viscosidade relativa (μ_r) com a concentração volumétrica (ϕ) apresenta uma relação linear e tem a forma básica como apresentada na fórmula 15. A constante a (inclinação da reta) e b (valor interceptado) são determinados a partir de dados reológicos experimentais.

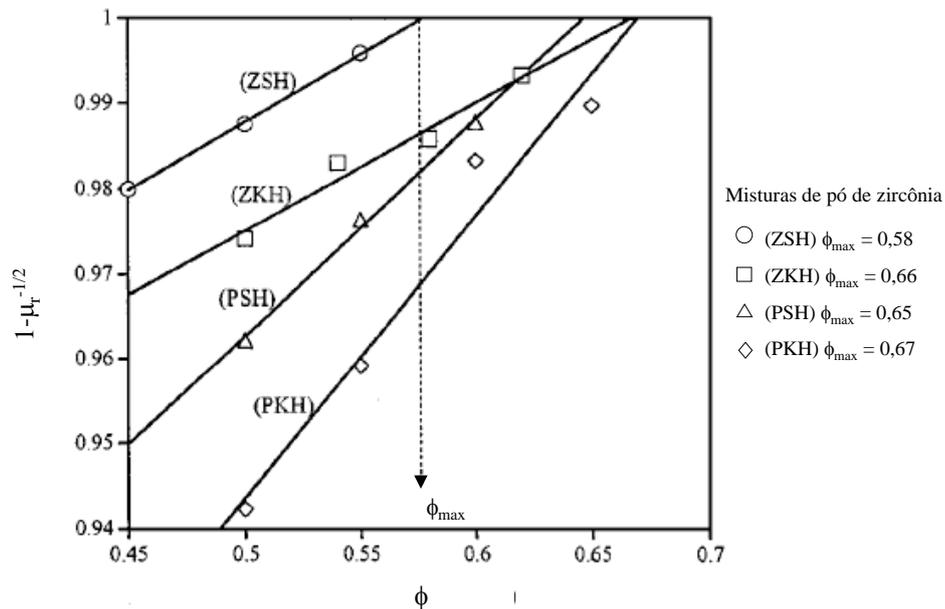
$$1 - \mu_r^{-1/2} = a \cdot \phi + b \quad (\text{fórmula 15})$$

Da fórmula 15, verifica-se que quando a concentração volumétrica se aproxima da máxima fração de empacotamento (ϕ_{\max}), a viscosidade relativa da suspensão tende ao infinito, e a fórmula 15 pode ser reescrita como:

$$1 = a \cdot \phi_{\max} + b \quad (\text{fórmula 16})$$

Dessa forma, a máxima fração de empacotamento pode ser facilmente determinada via plotagem $1 - \mu_r^{-1/2}$ versus a concentração (ϕ) através do uso de poucos dados experimentais (figura 8). A máxima fração de empacotamento é o valor da concentração que corresponde ao valor unitário de $1 - \mu_r^{-1/2}$.

Figura 8 – Viscosidade relativa da suspensão ($1-\mu_r^{-1/2}$) em função da concentração volumétrica (ϕ), adaptado de LIU, 2000



3.5 CÁLCULO ANALÍTICO DA VISCOSIDADE

Para o estudo do comportamento reológico de suspensões, é possível encontrar na literatura muitos trabalhos que apresentam uma relação entre a concentração volumétrica de sedimentos e a viscosidade. Einstein foi o pioneiro e, em 1911, propôs, a partir de uma base teórica, uma equação que relaciona a concentração e a viscosidade relativa (fórmula 17). A expressão de Einstein não considera o tamanho da partícula, a posição ou o efeito da interação entre elas e, por esta razão, essa expressão para a viscosidade relativa (μ_r), é válida apenas para as suspensões muito diluídas (para valores de concentração volumétrica menores que 2%).

$$\mu_r = 1 + 2,5.\phi \quad (\text{fórmula 17})$$

Onde:

μ_r = viscosidade relativa;

ϕ = concentração volumétrica (%).

Posteriormente, em 1972, Batchelor e Green expandiram esta fórmula para incluir termos de ordem superior que representam o efeito de outras partículas, sendo válida para valores de concentração em volume entre 2% a 10% (fórmula 18). A constante k pode variar de 4,2 a 6,2, uma vez que cada autor relacionou de diferentes maneiras os parâmetros adotados na formulação da equação (apud SHEWAN et al., 2015).

$$\mu_r = 1 + 2,5.\phi + k.\phi^2 \quad (\text{fórmula 18})$$

Para suspensões moderadamente concentradas ($\phi < 45\%$), com dados de suspensões de esfera monodispersa (mesmo diâmetro) e polidispersa (diversos diâmetros), a equação empírica proposta por Chong et al. (1971) (fórmula 19) considera ainda a máxima fração de empacotamento (ϕ_{\max}). O valor de k assume o valor de 7,5 para partículas esféricas.

$$\mu_r = \left[1 + \frac{k}{\left(\frac{\phi_{\max}}{\phi} - 1 \right)} \right]^2 \quad (\text{fórmula 19})$$

A equação semi-empírica proposta por Krieger e Dougherty (1959) (fórmula 14) para suspensões mais concentradas apresenta o coeficiente de viscosidade intrínseca $[\mu]$ que exprime o efeito de uma partícula isolada, ou seja, sem influência de interações moleculares, sobre a viscosidade do solvente. Considerando uma suspensão diluída, no seu limite, isto é, para concentrações volumétricas próximas de zero, a viscosidade relativa da suspensão adotada, é suposta como obedecendo a relação proposta por Einstein (fórmula 17). Na equação proposta por Krieger e Dougherty (1959) o produto do expoente $[\mu]\phi_{\max}$ tem o valor aproximado de 2 para esferas. Coussot (1997) afirma que esta equação não permite reproduzir os resultados experimentais para toda a gama de concentrações.

$$\mu_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)^{-[\mu] \cdot \phi_{\max}} \quad (\text{fórmula 14})$$

Conforme ocorre o aumento da concentração volumétrica de uma suspensão, as partículas entram em contato mais próximo e as muitas interações entre elas devem ser levadas em consideração. Para uma concentração volumétrica maior que 20%, o modelo desenvolvido por Maron e Pierce (1956) considera essas interações entre as partículas (dissipação de energia viscosa e movimento Browniano) (fórmula 20).

$$\mu_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)^{-2} \quad (\text{fórmula 20})$$

Santamaría-Holek (2010) propõem um modelo que, a princípio, pode ser aplicado para partículas de qualquer forma, desde que a viscosidade intrínseca seja conhecida (fórmula 21). O efeito da interação entre as partículas é introduzido por meio da concentração volumétrica efetiva (ϕ_{ef}) (fórmula 22).

$$\mu_r = (1 - \phi_{ef})^{-[\mu]} \quad (\text{fórmula 21})$$

$$\phi_{ef} = \frac{\phi}{1 - [(1 - \phi_{\max}) \cdot \phi / \phi_{\max}]} \quad (\text{fórmula 22})$$

Browers (2010) apresenta uma expressão baseada na geometria das partículas para misturas com baixa concentração de partículas monodispersas (partículas com aproximadamente o mesmo tamanho). O modelo ainda leva em consideração o efeito da viscosidade intrínseca e da máxima fração de empacotamento (fórmula 23).

$$\mu_r = \left(\frac{1 - \phi}{1 - (\phi / \phi_{\max})} \right)^{(\mu \cdot \phi_{\max}) / (1 - \phi_{\max})} \quad (\text{fórmula 23})$$

Horri et al (2011) ajustaram uma equação para suspensões cerâmicas ($\phi < 40\%$) usando um parâmetro que contém a concentração volumétrica e a máxima fração de empacotamento ($\phi/(\phi_{\max} - \phi)$) proposto, originalmente, por Dabak e Yucel (1986). O termo no denominador representa o espaço disponível para as partículas se movimentarem. Quando a concentração de partículas é pequena em comparação com o denominador, as partículas podem se mover facilmente, resultando em uma menor resistência ao fluxo. Por outro lado, quando a concentração se aproxima da máxima fração de empacotamento, o espaço relativo disponível para movimentação das partículas irá diminuir e, assim, a resistência ao fluir irá aumentar drasticamente. Na equação de Horri et al. (2011), o parâmetro k é uma constante que pode ser estimada experimentalmente (fórmula 24).

$$\mu_r = 1 + \mu \cdot \phi + k \cdot \phi \left(\frac{\phi}{\phi_{\max} - \phi} \right)^2 \quad (\text{fórmula 24})$$

Em 1962, Rutgers identificou na literatura a existência de 96 fórmulas para descrever o comportamento da viscosidade em função da presença de sólidos. Atualmente se encontram equações que relacionam a viscosidade e a taxa de cisalhamento através de uma Lei de Potência, no entanto, há poucas relações que descrevem o comportamento da viscosidade em função da presença de sólidos e da taxa de cisalhamento. Bournonville et al. (2002) modificaram a equação empírica proposta por Nzihou et al. (1998) (fórmula 25) formulando a equação abaixo (fórmula 26). O expoente G é igual a 2,5 e tem origem na equação de Krieger e Dougherty (1959), o expoente E é igual a 0,5 e é o mesmo utilizado para descrever a tensão de cisalhamento inicial no modelo de Casson (figura 1) e D (160/170) é uma constante obtida nos ensaios com cinzas volantes (resíduo da queima do carvão).

$$\mu_r = \left[1 + 0,81 \cdot \frac{\frac{\phi}{\phi_{\max}}}{\left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)} \right]^{0,5 \cdot \tau - 1,3} \quad (\text{fórmula 25})$$

$$\mu_r = \left[1 + \frac{D}{\gamma^E} \frac{\frac{\phi}{\phi_{\max}}}{\left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)} \right]^G \quad (\text{fórmula 26})$$

Coussot (1997) alerta que as propriedades reológicas mais complexas podem ser observadas em suspensões concentradas, apesar de não serem consideradas na formulação das equações. Estas propriedades se originam-se, principalmente, do fato de que a orientação e/ou a distribuição das partículas podem variar de acordo com o tempo de cisalhamento e que nenhum desses fenômenos são considerados nos modelos acima citados. Para suspensões diluídas (concentração volumétrica < 2%) e de concentração moderada (concentração volumétrica < 40%), esses efeitos podem induzir ligeiras tendências não Newtonianas e, para suspensões altamente concentradas, a ocorrência de efeitos tixotrópicos.

As equações apresentadas anteriormente estão resumidas na tabela 3.

Tabela 3 – Modelos de equações para o cálculo da viscosidade relativa

Modelo	Relação	Referência
Einstein (1911)	$\mu_r = 1 + 2,5\phi$	Fórmula 17
Batchelor e Green (1972)	$\mu_r = 1 + 2,5\phi + k\phi^2$	Fórmula 18
Chong et al. (1971)	$\mu_r = \left[1 + \frac{k}{\left(\frac{\phi_{\max}}{\phi} - 1 \right)} \right]^2$	Fórmula 19
Krieger e Dougherty (1959)	$\mu_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}} \right)^{-[\mu]\phi_{\max}}$	Fórmula 14
Maron e Pierce (1959)	$\mu_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}} \right)^2$	Fórmula 20
Santamaría-Holek et al. (2010)	$\mu_r = (1 - \phi_{ef})^{-[\mu]}$	Fórmula 21
	$\phi_{ef} = \frac{\phi}{1 - [(1 - \phi_{\max})\phi/\phi_{\max}]}$	Fórmula 22
Browers (2010)	$\mu_r = \left(\frac{1 - \phi}{1 - (\phi/\phi_{\max})} \right)^{(\mu\phi_{\max})/(1-\phi_{\max})}$	Fórmula 23
Horri et al. (2011)	$\mu_r = \left(1 + \mu\phi + k\phi \left(\frac{\phi}{\phi_{\max} - \phi} \right) \right)^2$	Fórmula 24
Nzihou et al. (1998)	$\mu_r = \left(1 + 0,81 \frac{\frac{\phi}{\phi_{\max}}}{\left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}} \right)} \right)^{0,5\tau - 1,3}$	Fórmula 25
Bournonville et al. (2002)	$\mu_r = \left(1 + \frac{D}{\gamma^E} \frac{\frac{\phi}{\phi_{\max}}}{\left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}} \right)} \right)^G$	Fórmula 26

3.6 REOMETRIA

A reometria é geralmente entendida, como um conjunto de técnicas padrão que são utilizadas para determinar experimentalmente as propriedades reológicas de um material. Neste capítulo é apresentado o reômetro, seu funcionamento e como suas medições podem ser usadas para inferir as propriedades reológicas do material testado. Em seguida, é fornecida uma visão geral sobre a escolha do dispositivo de medição (*spindle*) e discutida as limitações do reômetro como resultado dos efeitos indesejados que o material pode sofrer.

3.6.1 Reômetro

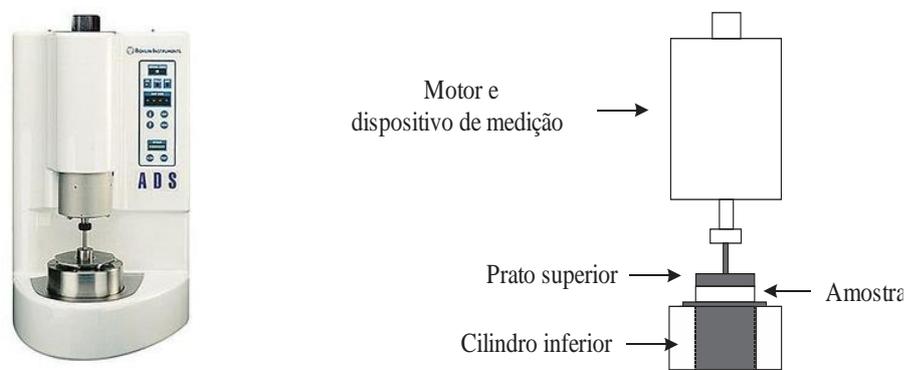
O reômetro utilizado nesse trabalho (C-VO da marca Bolhin) é constituído de um motor, que incorpora um rolamento a ar capaz de sustentar e de reunir em uma cavidade oca um eixo rotativo (figura 9). Esse sistema é que confere precisão na realização das medidas, uma vez que não há qualquer contato entre as partes fixas e móveis. Basicamente, o reômetro é um motor que pode exercer um torque/força em um material e medir sua resposta com o tempo (ou, inversamente, pode impor uma pressão e medir o torque resultante).

O conjunto de medição é composto por um cilindro inferior fixo e pela geometria de medição superior que é presa por meio de uma rosca, na extremidade inferior do eixo (figura 5). Ao redor do cilindro inferior há uma unidade de controle de temperatura composto de uma pastilha termoelétrica (pastilha Peltier). Esse dispositivo permite o ajuste exato da temperatura desejada, o que garante à amostra um valor constante de temperatura ao longo da realização do ensaio.

O equipamento oferece três tipos de testes que se diferenciam quanto ao modo de aplicação da deformação à amostra: fluência (*creep test*), viscometria e oscilação. O teste de oscilação e o *creep test* não serão discutidos, visto que não serão utilizados neste trabalho. Tratando-se do teste que mede a viscosidade do fluido, o reômetro pode operar com o controle da tensão. Esse modo de operação consiste na aplicação constante de um valor de torque, sendo o mesmo detectado por um sensor, conectado ao sistema, cuja leitura é convertida em deformação, a qual, sendo monitorada ao longo de um tempo, é transformada em tensão de

cisalhamento. O reômetro pode ainda operar com o controle da taxa de cisalhamento, em que uma velocidade constante é aplicada no motor e um torque é detectado e medido pelo sistema. Segundo Chhabra (2008), operar com o modo de tensão controlada é reconhecido como sendo mais eficiente, uma vez que, em baixas tensões, a estrutura do material pode ser preservada durante o teste, além de ser o modo ideal para se trabalhar com baixas taxas de cisalhamento e com a determinação da tensão de cisalhamento inicial. O autor ainda afirma que o uso desse método para fluidos Newtonianos gera dados confiáveis, entretanto, para fluidos não Newtonianos, a análise e interpretação dos resultados nem sempre é simples.

Figura 9 – Reômetro



(fonte: baseado em CHHABRA; RICHARDSON, 2008)

3.6.2 A escolha do *spindle*

O *spindle* (figura 10) é um acessório com o qual se realiza o teste de cisalhamento. A estabilidade do fluxo é um critério importante na definição do melhor *spindle* para os ensaios. Algumas geometrias de medição proveem boas aproximações, mas são limitadas na caracterização de fluidos com comportamento não Newtoniano (CHHABRA, 2008). A escolha do melhor *spindle* depende das propriedades reológicas das suspensões, que *a priori*, são desconhecidas, o que torna então necessário realizar uma série de testes para a escolha do *spindle* mais adequado. Entretanto, é possível escolher um *spindle* apropriado baseado nas seguintes informações (TROPEAL et al., 2007):

- 1) O conhecimento da faixa de tensão ou taxa de cisalhamento de interesse – pressupõem-se que nessa faixa o fluxo seja estável;

- 2) A possibilidade da existência de uma tensão de cisalhamento inicial, tanto quanto a ordem de magnitude da viscosidade e/ou da tensão normal;
- 3) A possibilidade de evitar o efeito de deslizamento de parede (*wall slip*) ou, se não for possível, fazer a detecção e correção do efeito.

De forma semelhante, Coussot (1997) afirma que a escolha das dimensões do *spindle* depende dos possíveis efeitos/perturbações que podem ocorrer durante a reometria de cisalhamento.

Figura 10 – Diferentes modelos de *spindle*: a) Prato Paralelo b) Cilindro Concêntrico c) Cilindro Concêntrico com Aletas – *Vane* e d) Cilindro Concêntrico com Copo Invertido – *Double Gap*

a) Prato Paralelo



b) Cilindro Concêntrico



c) Cilindro Concêntrico com Aletas - *Vane*

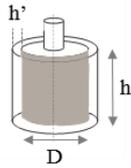
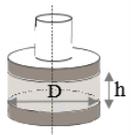
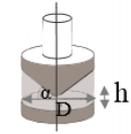


d) Cilindro Concêntrico com Copo Invertido - *Double Gap*



Na tabela 4, foram resumidas as principais vantagens e desvantagens dos diversos *spindles* e possíveis problemas experimentais.

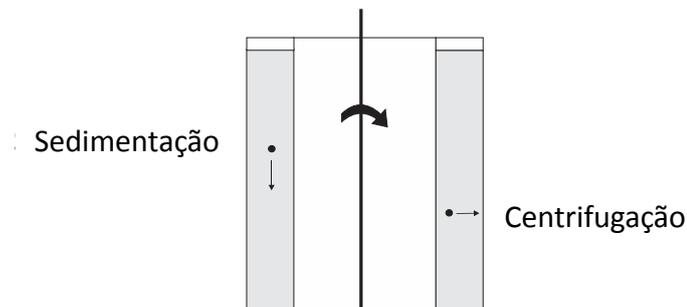
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens dos diversos *spindles* e problemas experimentais (adaptado de COUSSOT, 1997)

<i>Spindle</i>	Volume e dimensões mínimas	Taxa de cisalhamento	Problemas experimentais	Efeito nas medidas
<p>Cilindros Concêntricos com abertura grande</p> 	$h' = 30d$ $h = 10h' = 300d$ $D = 4h' = 120d$ $V \approx 4,2 \cdot 10^6 d^3$	Heterogêneas: varia radialmente por causa da variação da tensão de cisalhamento no interior de cilindro externo	<ul style="list-style-type: none"> - Efeito de borda (<i>edge effetc</i>) devido a rigidez da superfície da geometria de medição - Deslizamento na parede (<i>wall slip</i>) interna ou externa do cilindro - Ruptura (<i>fracture</i>) geralmente localizada ao redor do cilindro - Centrifugação 	<ul style="list-style-type: none"> - A viscosidade aparente aumenta - A viscosidade aparente diminui - A viscosidade aparente diminui - Diminuição da viscosidade quando as partículas se movem para fora, do contrário, a viscosidade aumenta
<p>Cilindros Concêntricos com abertura pequena</p>	$D = 30h = 900d$ $V \approx 2,6 \cdot 10^7 d^3$	Aproximadamente homogênea	<ul style="list-style-type: none"> - Sedimentação 	<ul style="list-style-type: none"> - Efeito variável, dependendo do novo meio viscoso da suspensão heterogênea, e possível acúmulo de partículas no fundo
<p>Prato Paralelo</p> 	$h = 30d$ $D = 10h = 300d$ $V \approx 2 \cdot 10^6 d^3$ Schramm (2006) afirma que a distancia h deve ser de pelo menos 3 vezes maior que o maior tamanho de partícula e $0,3 \text{ mm} < h < 3 \text{ mm}$	Heterogênea, variando de zero do eixo à um valor máximo na borda	<ul style="list-style-type: none"> - Os efeitos de borda (<i>edge effetc</i>) ocorrem devido ao fluido em excesso na periferia - Rachadura (<i>crack</i>) - Deslizamento na parede (<i>wall slip</i>) - Migração causada por uma tensão induzida na direção radial - Ruptura (<i>fracture</i>) - Centrifugação - Sedimentação 	<ul style="list-style-type: none"> - A viscosidade aparente aumenta devido à resistência adicional - Efeito variável, dependendo da extensão da região rígida - A viscosidade aparente diminui - A viscosidade aparente diminui - A viscosidade aparente diminui - Diminuição da viscosidade quando as partículas se movem para fora, do contrário, a viscosidade aumenta - Efeito variável, dependendo do novo meio viscoso da suspensão heterogênea
A disponibilidade de grandes aberturas entre os pratos pode ser usado para superar as limitações encontradas na geometria cone e prato como a presença de partículas muito grandes na suspensão ou que a mesma tenha uma concentração muito alta (> 60%). Pode ser usado para baixas taxas de cisalhamento e fluidos com altos valores de limite de escoamento (Schramm, 2006)				
<p>Cone e Prato</p> 	$\alpha < 6^\circ$; $h = 30d$ $D = 2875d$ $V \approx 6 \cdot 10^8 d^3$	Homogênea	Problemas idênticos ao do prato paralelo podendo negligenciar o efeito de migração devido a tensão ser homogênea	Efeito nas medidas idênticos ao do prato paralelo
Ângulos superiores a 4 são normalmente utilizados em suspensões que contem partículas grandes. Vantagens: posso aplicar altas taxas de cisalhamento (> 104 s ⁻¹). Adequado para valores médios e altos de viscosidade Schramm (2006), mas segundo Chhabra (2008) é adequado para valores baixos a médio de viscosidade. Requer um volume de amostra menor que a das outras geometrias de medição (<~5 cm ³) Chhabra (2008) .				

d = diâmetro da partícula

Com a geometria “cilindros concêntricos” é possível observar dois fenômenos: a **centrifugação** e a **sedimentação** de partículas (figura 11). No primeiro, as partículas grossas movem-se através de um material fino devido à rotação do cilindro. A separação das fases, resultante da diferença de densidade, pode ocorrer em repouso devido às forças de gravidade variarem de um elemento para outro (sedimentação). Contudo, a separação de fases também pode ser induzida ou estimulada pelo escoamento. Dessa forma, uma vez que a distribuição das tensões de cisalhamento é heterogênea desde o início do escoamento, quando o material é homogêneo, podem-se esperar efeitos adicionais, nesse caso, o fenômeno de **centrifugação** e **sedimentação**, em que a concentração da mistura torna-se heterogênea, levando a uma viscosidade não homogênea (COUSSOT, 2005).

Figura 11 – Efeito de sedimentação e centrifugação



O estudo dos possíveis tipos de comportamento reológico que uma suspensão de água e sedimento pode apresentar está intimamente relacionado com o conhecimento da sua microestrutura e dos parâmetros físicos dos seus componentes. No capítulo que segue, é apresentada uma breve descrição das características físicas dos sedimentos utilizados nessa pesquisa e da metodologia experimental aplicada.

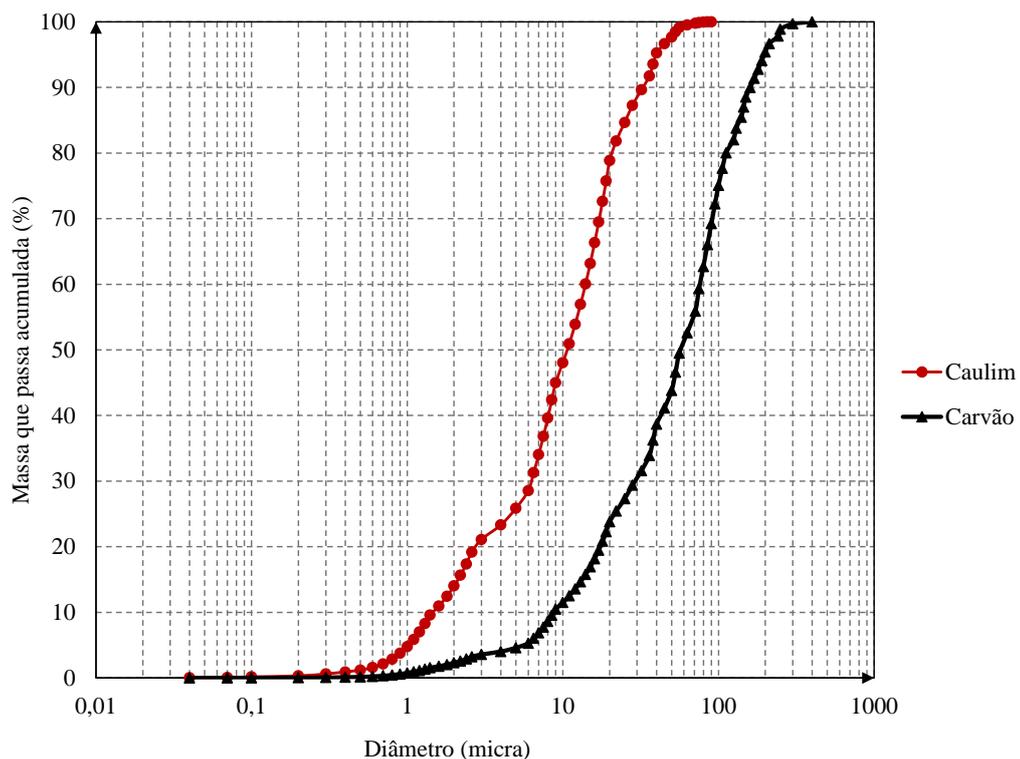
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 SEDIMENTOS E SUAS MISTURAS

As características físicas dos minerais desempenham um papel importante no comportamento reológico das misturas que a compõem. Neste trabalho, será utilizado o carvão mineral 205 do tipo Cardiff – empregado nas simulações físicas para representar as frações de areia muito fina e o caulim - representando as frações de argila em um escoamento de corrente de turbidez.

O carvão foi obtido junto à empresa Rio Deserto S.A. de Criciúma/SC e apresenta uma massa específica de 1190 kg/m^3 , faixa granulométrica de $0,07$ a $400 \text{ }\mu\text{m}$ e d_{50} de $47,98 \text{ }\mu\text{m}$. O caulim foi adquirido junto à empresa Raabe Calcários Ltda. de Pântano Grande/RS e apresenta uma massa específica de 2600 kg/m^3 , faixa granulométrica de $0,04$ a $90 \text{ }\mu\text{m}$ e d_{50} de $8,22 \text{ }\mu\text{m}$. A distribuição granulométrica pode ser vista na figura 12.

Figura 12 – Distribuição granulométrica



As misturas eram preparadas em potes, na qual consistia em misturar com uma colher a quantidade fixa de 100 ml de água e a quantidade de caulim e/ou carvão que deveriam ser adicionadas conforme a proporção de sedimento e concentração volumétrica desejada.

4.2 METODOLOGIA

Tratando-se de fluidos complexos (caso dos fluidos naturais), a prática da reometria está longe de ser simples e possuir um conjunto de técnicas prontas para usar. Por conseguinte, a investigação das propriedades reológicas de um material geralmente requer muitos testes usando diferentes procedimentos.

4.2.1 Procedimento experimental

A metodologia de operação do reômetro consistia em colocar o *spindle* selecionado no equipamento e colocar, com o uso de uma seringa, a quantidade de aproximadamente 1,5 ml de fluido entre as geometrias de medição, para o caso do *spindle* cone e prato e, a quantidade de 10 ml para os *spindles* cilindro concêntrico e vane. Posteriormente, os parâmetros para cada ensaio eram ajustados no próprio aplicativo do reômetro, entre eles, a temperatura de ensaio (20°C), a faixa de variação da tensão a ser aplicada, o tempo e o tipo de ensaio, no caso, tensão controlada.

Esse dispositivo permite o ajuste exato da temperatura desejada, o que garante à amostra um valor constante de temperatura ao longo da realização do ensaio.

4.2.2 Plano de ensaios executados

Testes iniciais foram feitos para verificar a possibilidade de usar um mesmo *spindle* para todos os tipos de mistura e concentração volumétrica. Na tabela 5, encontram-se os valores de concentração volumétrica e a composição dos materiais utilizada, totalizando 42 suspensões.

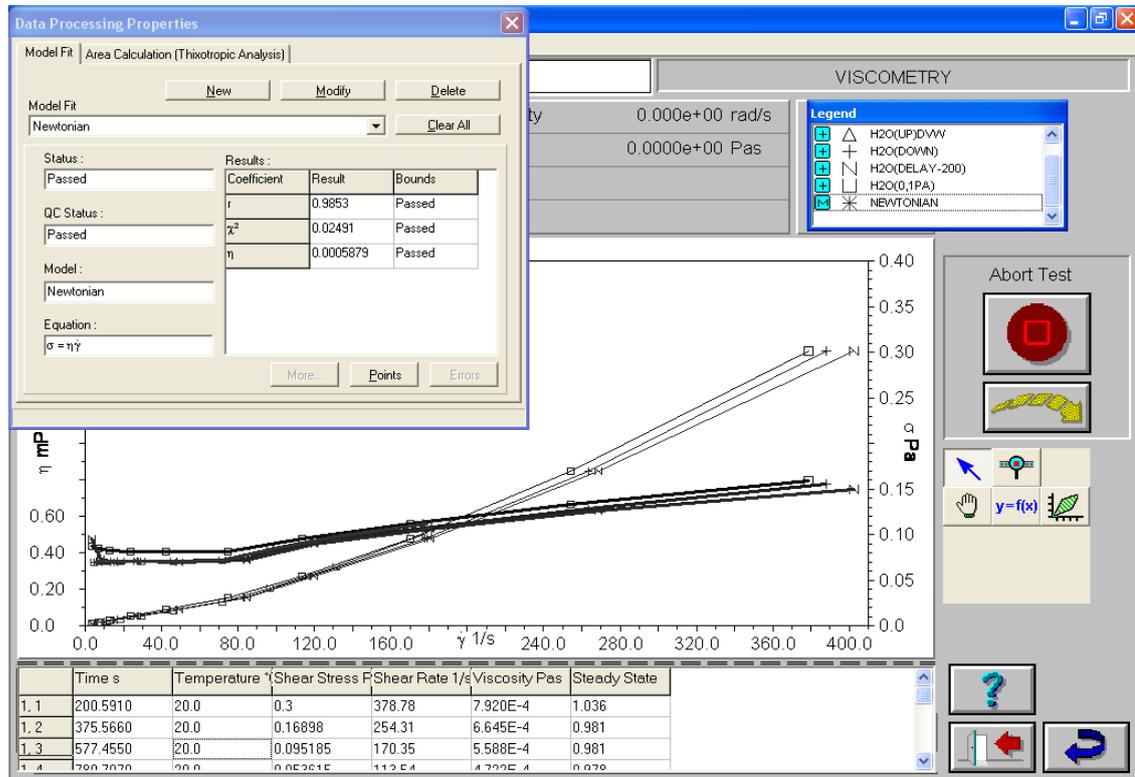
Tabela 5 – Composição da mistura e concentração volumétrica usada nos ensaios

Composição da Mistura		Concentração Volumétrica (%)
% Caulim	% Carvão	
100	0	
85	15	
75	25	5 - 10 - 15 - 20 -
50	50	25 - 30
25	75	
15	85	
0	100	

4.2.3 Análise dos dados gerados

Uma das dificuldades em se trabalhar com misturas com partículas suspensas é a ocorrência de uma possível separação de fases da mistura, resultante da diferença de densidade entre os elementos e a ação da gravidade (sedimentação). Para garantir que os dados experimentais, usados para gerar a curva que descreve o comportamento reológico, fossem obtidos com a amostra em estado homogêneo, ou seja, sem a ocorrência do efeito da sedimentação/ressuspensão das partículas, foi determinada a tensão de deformação ou taxa de cisalhamento mínimas a serem consideradas no ajuste dos dados resultantes do teste de cisalhamento. Em seguida, com os resultados obtidos, era escolhido o melhor modelo reológico dentre os disponíveis no aplicativo. Após selecionar os dados mais coerentes entre si, as curvas eram agrupadas em uma única série de dados e o modelo escolhido era aplicado (figura 13).

Figura 13 – Tela de resultados do teste



4.2.4 Incertezas experimentais

Uma vez que a precisão do equipamento é de $\pm 5\%$, os dados dentro do intervalo de confiança do equipamento podem variar de $\pm 5\%$ com relação ao valor medido. Na busca para minimizar os erros aleatórios dos ensaios, os dados reométricos apresentados são resultado da repetição de vários ensaios (mais de 5) para uma mesma suspensão.

5 RESULTADOS

Durante o ajuste da metodologia do reômetro, foram testados e aplicados parâmetros de ensaio e geometria os quais resultaram definidos conforme abaixo descrito.

5.1 SELEÇÃO DO *SPINDLE*

Nos primeiros testes, o que se achava ser uma das vantagens do uso do *spindle* prato paralelo, ou seja, a possibilidade que o usuário tem em determinar a abertura entre os pratos em virtude da presença de partículas muito grandes (caso do carvão) ou de uma suspensão muito concentrada, gerou um problema experimental: a ocorrência do deslizamento junto à parede (*wall slip*). Esse efeito é considerado como o resultado de uma diminuição na concentração de elementos perto da superfície superior da geometria do *spindle*. Nessa região menos concentrada, em geral, a viscosidade é menor do que a do resto do fluido. Como consequência, para uma similar tensão de cisalhamento, a taxa de cisalhamento na região menos concentrada é maior do que a taxa de cisalhamento um pouco mais longe da superfície, na região homogênea. Não há um consenso quanto à explicação física desse fenômeno, contudo, tem sido sugerido que as interações na superfície sólido-líquido podem ser maiores dos que as interações moleculares (COUSSOT, 2005). Nas figuras abaixo (14 e 15), é possível notar a ocorrência do deslizamento junto à parede (*wall slip*) que gera diferentes curvas de fluxo, cujo valores de tensão de deformação (figura 14) e viscosidade aparente (figura 15) diminuem com o aumento da altura (abertura) entre os pratos para uma mesma taxa de cisalhamento.

Figura 14 – Curvas de fluxo de uma mistura de água e argila com Cv 30% cisalhada no *spindle* prato paralelo com diferentes aberturas (h)

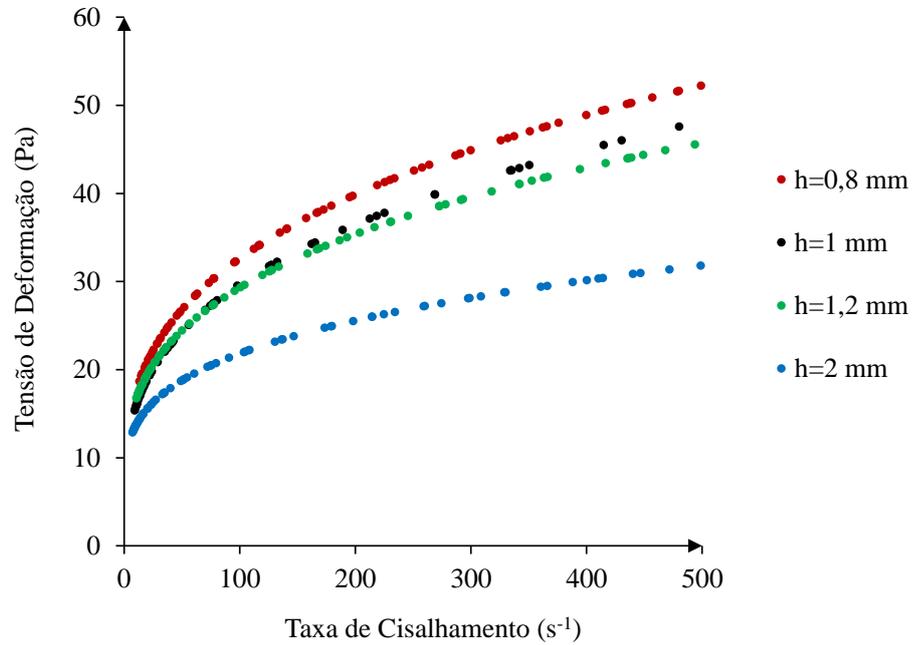
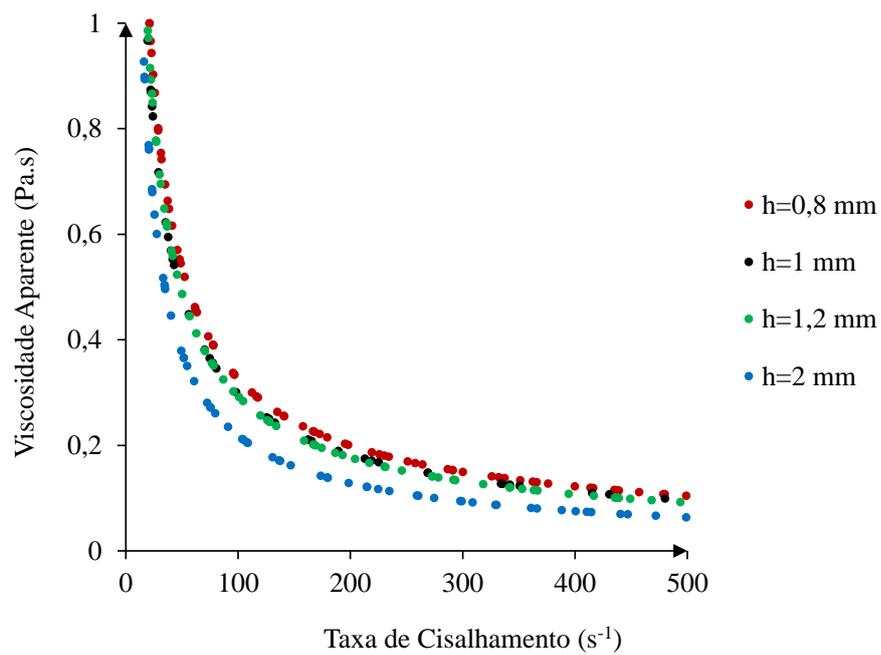


Figura 15 – Curvas de viscosidade aparente de uma mistura de água e argila com Cv 30% cisalhada no *spindle* prato paralelo com diferentes aberturas (h)



Nessa parte do trabalho ficou clara a dificuldade de adequar um único *spindle* à gama extensa de concentrações volumétricas e proporções de misturas. Foram identificados ao menos 3 tipos de propriedades distintas das suspensões que poderiam guiar não apenas a escolha de um *spindle*, mas de um *spindle* que melhor caracterizaria determinado tipo de suspensão. Para as suspensões coloidais e mais concentradas ($C_v > 20\%$), com propriedades não Newtonianas, foi utilizada o *spindle* vane (figura 10 letra c). Esse *spindle* evita o deslizamento das partículas na parede e a sedimentação, mas não é adequada para suspensões com baixas viscosidades e não coloidais, onde os efeitos inerciais se tornam importantes (BARNES, 2001). Para as misturas compostas apenas por caulim e concentração abaixo de 20%, optou-se por utilizar o *spindle* cone e prato de ângulo 4° e diâmetro de 40 mm (CP 4°/40), pois possui uma taxa de cisalhamento homogênea. Para o restante das misturas optou-se por utilizar o cilindro concêntrico com diâmetro de 25 mm (CC25). A tabela 6 ilustra os *spindles* escolhidos para as respectivas misturas.

Tabela 6 – *Spindles* escolhidos para as respectivas misturas

Misturas	Concentração Volumétrica (%)					
	5	10	15	20	25	30
100% caulim	CP 4°/40				Vane	
85% caulim 15% carvão	CC25					
75% caulim 25% carvão						
50% caulim 50% carvão						
25% caulim 75% carvão						
15% caulim 75% carvão						
100% carvão						

Um parâmetro importante a ser definido é o tempo em que a mistura é cisalhada. No ensaio de viscosidade, o aplicativo do equipamento monitora quando **estável** é um material através de uma função de tempo. Quando a velocidade se torna constante, o instrumento detecta uma condição de estado permanente (*steady state*) e grava os valores que caracterizaram essa condição. Logo, quanto mais tempo se leva para gerar cada ponto, mais precisos serão os dados. O tempo de ensaio das suspensões foi de aproximadamente 20 min e do ensaio da água, 37 min.

5.2 SEPARAÇÃO DE FASE

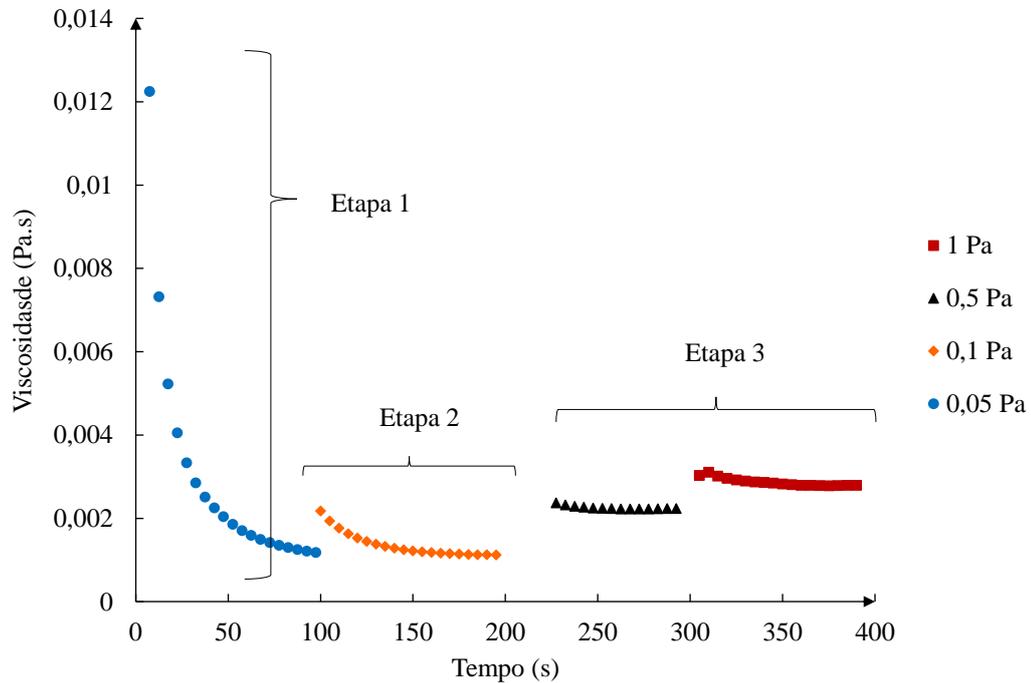
Outros dois fenômenos indesejados foram observados ao se utilizar o *spindle* cilindro concêntrico: a sedimentação/ressuspensão das partículas e a centrifugação.

5.2.1 Sedimentação e ressuspensão das partículas

A sedimentação e a ressuspensão das partículas da mistura pode ser visualizada por meio de uma evolução no comportamento da viscosidade em relação à velocidade de rotação do reômetro. O que se observa a partir de uma determinada velocidade de rotação do *spindle*, é que a velocidade de sedimentação das partículas é superada e, assim, as partículas passam a atuar sobre toda a área do *spindle*, o que acarreta em um aumento da viscosidade da mistura. O efeito da sedimentação e da ressuspensão pode ser visualizado no gráfico da figura 16, em que uma mistura de água e carvão com uma concentração volumétrica de 5% foi submetida a quatro diferentes tensões (0,05/0,1/0,5/1 Pa), mantidas constantes a cada 100 segundos. Três etapas do comportamento podem ser visualizadas (Figura 12) (SANTOS, 2003):

- a) Etapa 1: Inicialmente ocorre a quebra da estrutura do material, em que a mistura apresenta uma viscosidade infinita (como um corpo sólido) e, em seguida, ocorre a reestruturação dos grãos que ainda permanecem depositados.
- b) Etapa 2: Nessa segunda etapa, mesmo com o aumento da velocidade de rotação, a viscosidade se apresenta constante, isto porque a velocidade desenvolvida não é suficiente para ressuspender o material depositado.
- c) Etapa 3: Com o progressivo aumento da velocidade de rotação, a mesma torna-se suficiente para ressuspender todas as partículas, colocando-as em contato com todo o *spindle*, o que, conseqüentemente, gera um aumento da viscosidade.

Figura 16 – Efeito da sedimentação e ressuspensão de uma mistura de água e carvão com concentração volumétrica de 5%



Para as misturas que apresentaram um comportamento Newtoniano, a taxa de cisalhamento mínima para manter as partículas em suspensão é dada pela fórmula 27. Para o cálculo foram considerados os dados usados por Arrighi (2014), que estabeleceu um banco de dados de velocidade de queda do caulim e do carvão 205, do qual consta que a velocidade de sedimentação do carvão é de 0,00065 m/s e o raio da partícula é de 2,4E-5 m; enquanto que a velocidade de sedimentação do caulim é de 0,000098 m/s e o raio é de 4,11E-6 m.

$$\dot{\gamma}_{\min} = \frac{3.V_s.\mu}{2.r} \quad (\text{fórmula 27})$$

Onde:

$\dot{\gamma}_{\min}$ = taxa de cisalhamento mínima (s^{-1});

V_s = velocidade de sedimentação (m/s);

r = raio da partícula (m);

μ = viscosidade dinâmica (Pa.s).

Para as misturas que apresentaram um comportamento não Newtoniano, considera-se o conjunto de forças que atuam em uma esfera (gravidade, empuxo e arraste), que se move em velocidade constante através de um fluido não Newtoniano. Para que a esfera permaneça em repouso, o seguinte somatório de forças deve ser satisfeito (fórmula 28):

Força de Gravidade = Força de Empuxo + Força de Arrasto

$$\rho_s \cdot g \cdot V = \rho \cdot g \cdot V + \tau \cdot k_c \cdot A \quad (\text{fórmula 28})$$

Onde:

ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m^3);

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

V = volume da partícula (m^3);

A = área da superfície da partícula (m^2);

k_c = fator de forma, sendo $k_c \approx \pi/4 \approx 1$ para esfera;

τ = tensão de cisalhamento (Pa).

Para que não haja sedimentação das partículas durante o teste de cisalhamento, a tensão mínima (τ_{\min}) a ser aplicada deve ser menor que a tensão de cisalhamento inicial do fluido (τ_0) (fórmula 29).

$$\tau_{\min} = \frac{r \cdot g \cdot (\rho_s - \rho)}{3} \leq \tau_0 \quad (\text{fórmula 29})$$

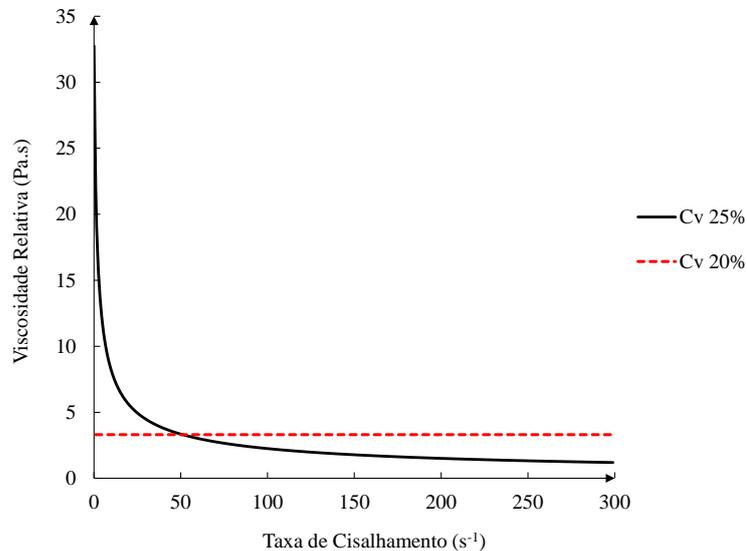
Dessa forma, para evitar que os resultados fossem influenciados pelo efeito da sedimentação/ressuspensão das partículas, à medida que era conhecido o comportamento reológico das misturas ensaiadas (Newtoniano ou não Newtoniano), era calculada a tensão de

cisalhamento ou a taxa de cisalhamento mínima para manter as partículas em suspensão que foram, então, consideradas no ajuste da curva do comportamento reológico

5.2.2 Centrifugação

Quando uma suspensão particulada é submetida a altas taxas de cisalhamento, as partículas são submetidas a uma força centrífuga que as leva a se mover em direção à parede do cilindro. Como consequência, a suspensão se torna heterogênea, o que acarreta em uma diminuição no valor da viscosidade medida. Esse efeito foi observado em diversas misturas ensaiadas e conforme pode ser visto na figura 17, para a mistura com 15% de caulim e 85% de carvão, a partir do valor de 50 (s^{-1}) de taxa de cisalhamento, a viscosidade relativa da mistura com concentração volumétrica de 25% passa a ser inferior ao da mistura com concentração volumétrica de 20%.

Figura 17 – Curva de viscosidade relativa em função da taxa de cisalhamento de misturas com Cv de 20 e 25% e compostas por 15% caulim e 85% carvão



De todos os ensaios realizados, a mistura com 15% de caulim e 85% carvão foi a mistura que demonstrou a ocorrência do efeito da centrifugação com o menor valor de taxa de cisalhamento ($50 s^{-1}$), e por essa razão, os valores de viscosidade relativa posteriormente mencionados neste trabalho, foram calculados referente ao valor de viscosidade aparente para a taxa de cisalhamento de $25 s^{-1}$.

A partir dos ensaios que orientaram a definição e escolha dos parâmetros do experimento e geometria, a caracterização reológica das misturas será apresentada no que segue.

5.3 REOLOGIA DAS MISTURAS COM 100% DE CAULIM

Relativo aos dados de viscosidade dinâmica das misturas com presença apenas de caulim, o modelo reológico que melhor se ajustou aos resultados foi o modelo Newtoniano para as concentrações de 5 e 10% e o modelo reológico de Herschel-Bulkley para as concentrações de 15, 20, 25 e 30%. A figura 18 apresenta os resultados e a tabela 7 mostra os parâmetros estatísticos dos ajustes dos modelos.

Figura 18 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 100% de caulim: a) concentração volumétrica de 5 e 10% b) concentração volumétrica de 15, 20, 25 e 30%

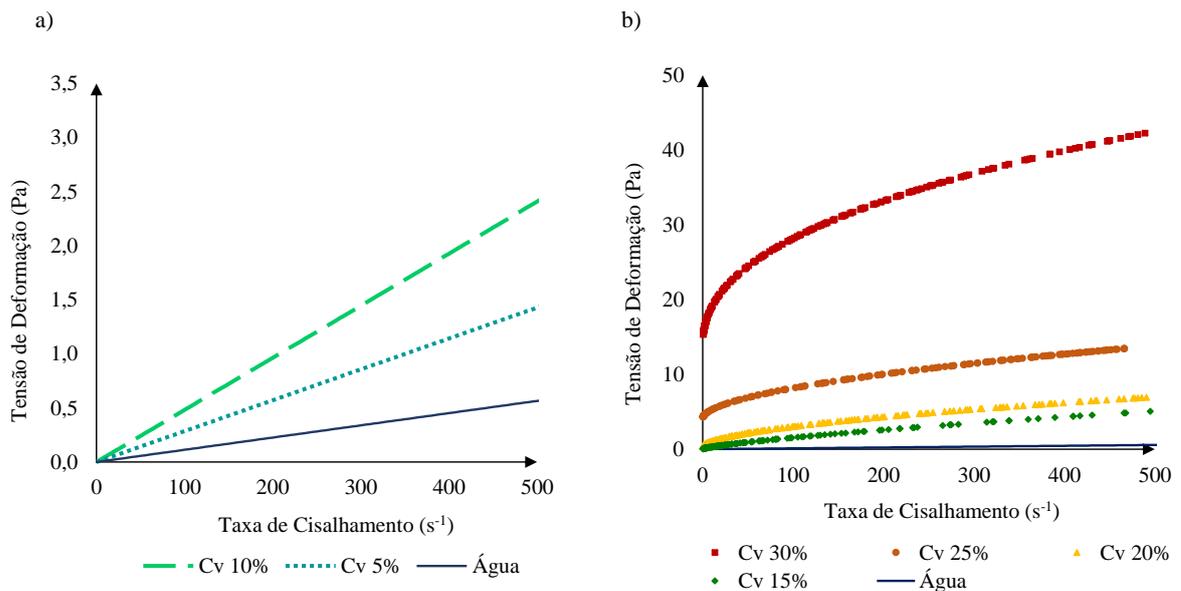
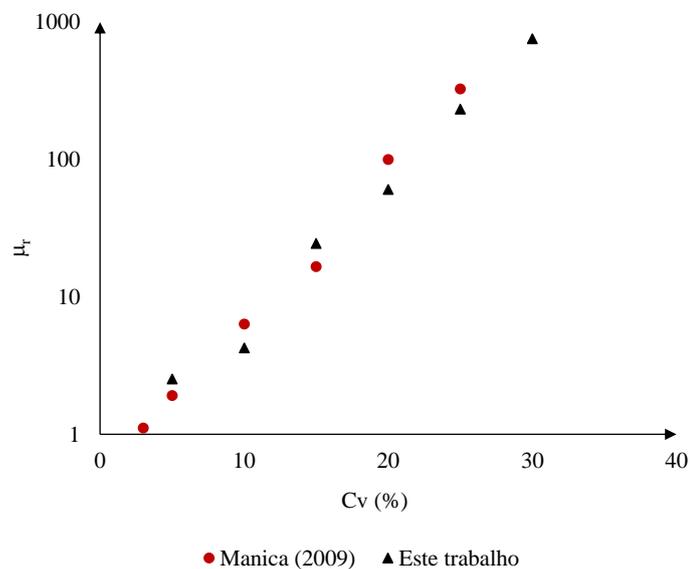


Tabela 7 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 100% de caulim

100% Caulim					
Concentração Volumétrica (%)	Coefficiente de Viscosidade Dinâmico - μ	σ_0	k	n	R^2
30	-	13,4800	2,0850	0,4238	98,54
25	-	4,0630	0,3396	0,5398	98,43
20	-	0,2630	0,2148	0,5542	98,78
15	-	0,0670	0,0566	0,7219	98,36
10	0,00482	-	-	1	96,95
5	0,00286	-	-	1	98,03
Água	0,00011	-	-	1	98,33

Manica (2009) caracterizou reologicamente misturas de caulim e micro-esferas de vidro com diferentes concentrações volumétricas e proporção de sedimentos, utilizando um reômetro semelhante (C-VOR da marca Bolhin) ao utilizado neste trabalho, porém com a utilização do *spindle* cone e prato para as misturas coesivas e prato paralelo para as misturas não coesivas e mistas (50% caulim e 50% esfera de vidro). Através da comparação dos dados para a mistura com 100% de caulim (figura 19) é possível verificar uma forte similaridade entre os valores, com um coeficiente de correlação de 99,96% entre os dados. Isso significa que a metodologia empregada nos ensaios fornece resultados confiáveis para a caracterização reológica de misturas com caulim.

Figura 19 – Gráfico da viscosidade relativa em função da concentração volumétrica para as misturas com 100% de caulim de Manica (2009) e deste trabalho



5.4 REOLOGIA DAS MISTURAS COM 100% DE CARVÃO

As misturas compostas apenas com carvão apresentaram um comportamento Newtoniano para as concentrações de 5, 10, 15, 20 e 25% e um comportamento conforme o modelo reológico de Herschel-Bulckley para a concentração de 30%. A figura 20 apresenta um gráfico que demonstra o comportamento reológico e a tabela 8 os parâmetros estatísticos do ajuste dos modelos.

Figura 20 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 100% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10, 15, 20 e 25%; b) concentração volumétrica de 30%

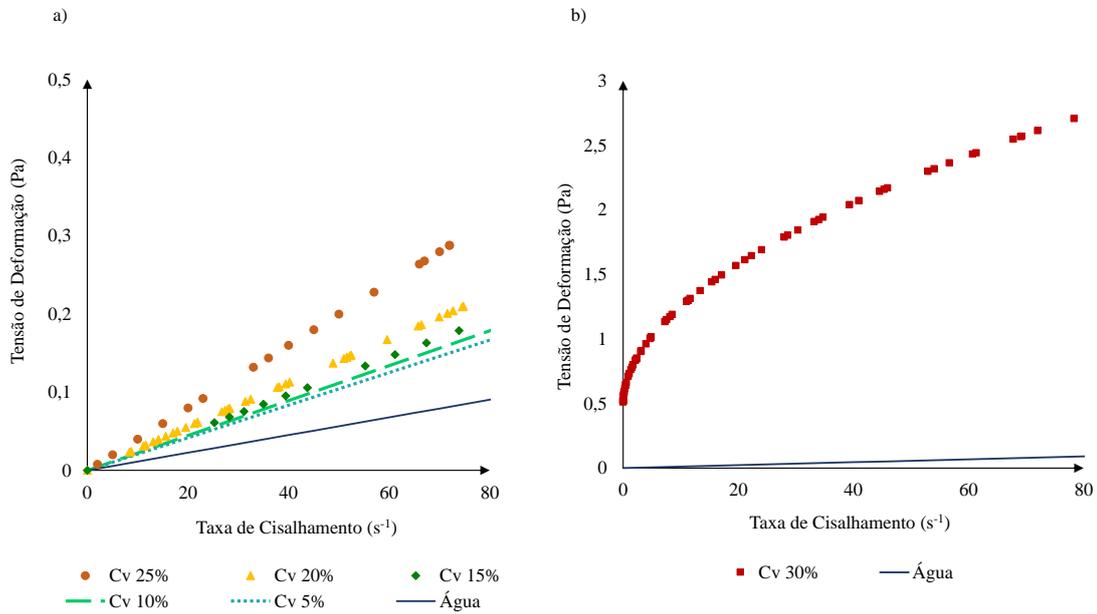


Tabela 8 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 100% de carvão

100% Carvão					
Concentração Volumétrica (%)	Coefficiente de Viscosidade Dinâmico - μ	σ_0	k	n	R ²
30	-	0,4951	0,2274	0,5219	98,58
25	0,00396	-	-	1	96,51
20	0,00319	-	-	1	99,49
15	0,00233	-	-	1	98,20
10	0,00204	-	-	1	97,12
5	0,00148	-	-	1	99,02
Água	0,00011	-	-	1	98,33

5.5 REOLOGIA DAS MISTURAS COM DIFERENTES PROPORÇÕES DE CAULIM E CARVÃO

Conforme pode ser visto nas tabelas de 9 a 13, a parcela de caulim na mistura condiciona a mudança do comportamento linear (Newtoniano) para um não-linear (não Newtoniano). Nas figuras 21 a 25 pode ser visualizado as curvas de fluxo das misturas ensaiadas.

Tabela 9 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 85% de caulim e 15% de carvão

85% Caulim_15% Carvão					
Concentração Volumétrica (%)	Coefficiente de Viscosidade Dinâmico - μ	σ_0	k	n	R ²
30	-	5,0960	1,1290	0,4039	98,83
25	-	2,1450	0,1051	0,6356	98,59
20	-	0,4770	0,0520	0,6470	97,89
15	-	0,1155	0,0163	0,7398	99,83
10	0,00368	-	-	1	98,44
5	0,00251	-	-	1	99,09
Água	0,00011	-	-	1	98,33

Figura 21 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 85% de caulim e 15% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10 e 15% b) concentração volumétrica de 20, 25 e 30%

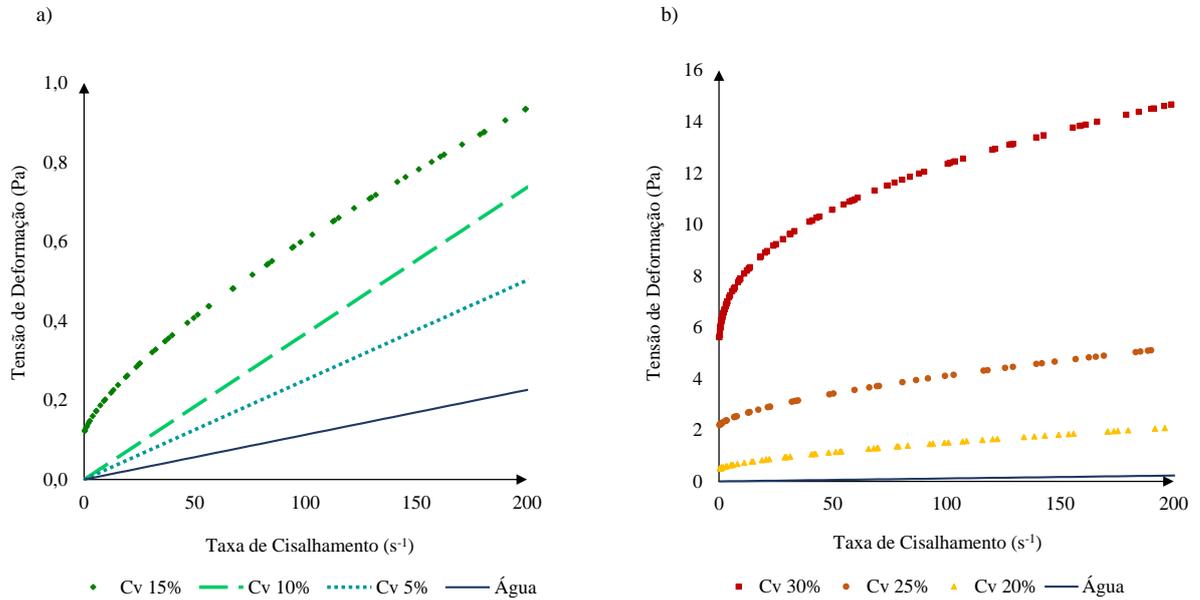


Tabela 10 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 75% de caulim e 25% de carvão

75% Caulim_25% Carvão					
Concentração Volumétrica (%)	Coefficiente de Viscosidade Dinâmico - μ	σ_0	k	n	R^2
30	-	2,7420	0,1996	0,5803	98,19
25	-	1,1020	0,0802	0,6096	98,32
20	-	0,3180	0,0352	0,7287	99,23
15	0,00462	-	-	1	97,95
10	0,00329	-	-	1	99,07
5	0,00239	-	-	1	98,65
Água	0,00011	-	-	1	98,33

Figura 22 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 75% de caulim e 25% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10 e 15% b) concentração volumétrica de 20, 25 e 30%

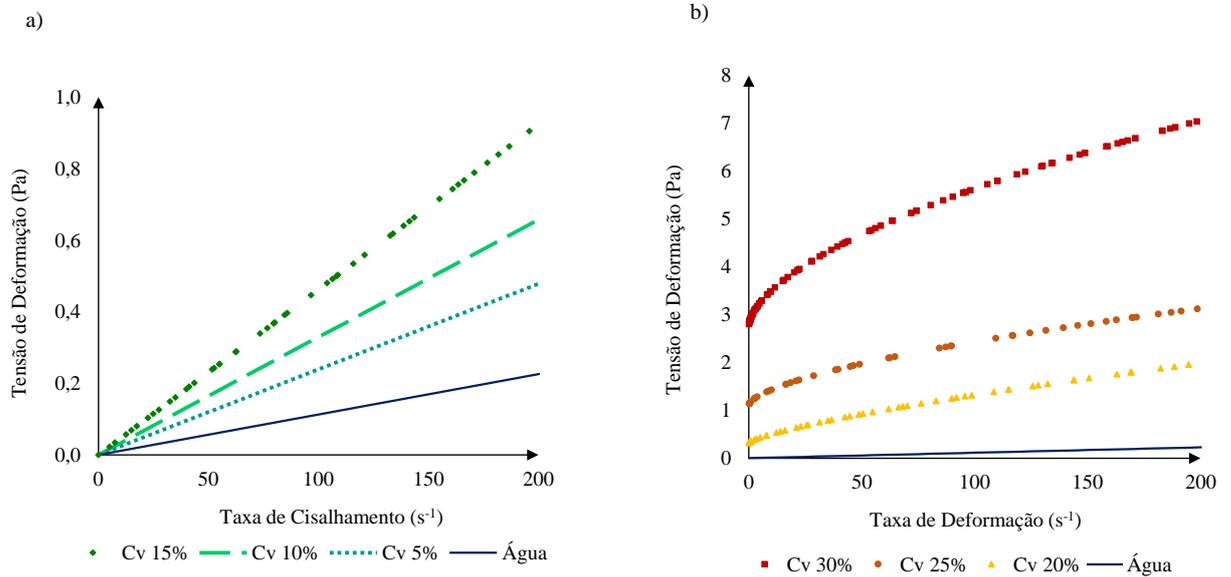


Tabela 11 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 50% de caulim e 50% de carvão

50% Caulim_50% Carvão					
Concentração Volumétrica (%)	Coefficiente de Viscosidade Dinâmico - μ	σ_0	k	n	R^2
30	-	0,4886	0,0839	0,6043	97,01
25	-	0,1416	0,0368	0,6755	98,56
20	-	0,0774	0,0181	0,7214	99,33
15	0,00377	-	-	1	99,09
10	0,00274	-	-	1	97,99
5	0,00198	-	-	1	99,50
Água	0,00011	-	-	1	98,33

Figura 23 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 50% de caulim e 50% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10 e 15% b) concentração volumétrica de 20, 25 e 30%

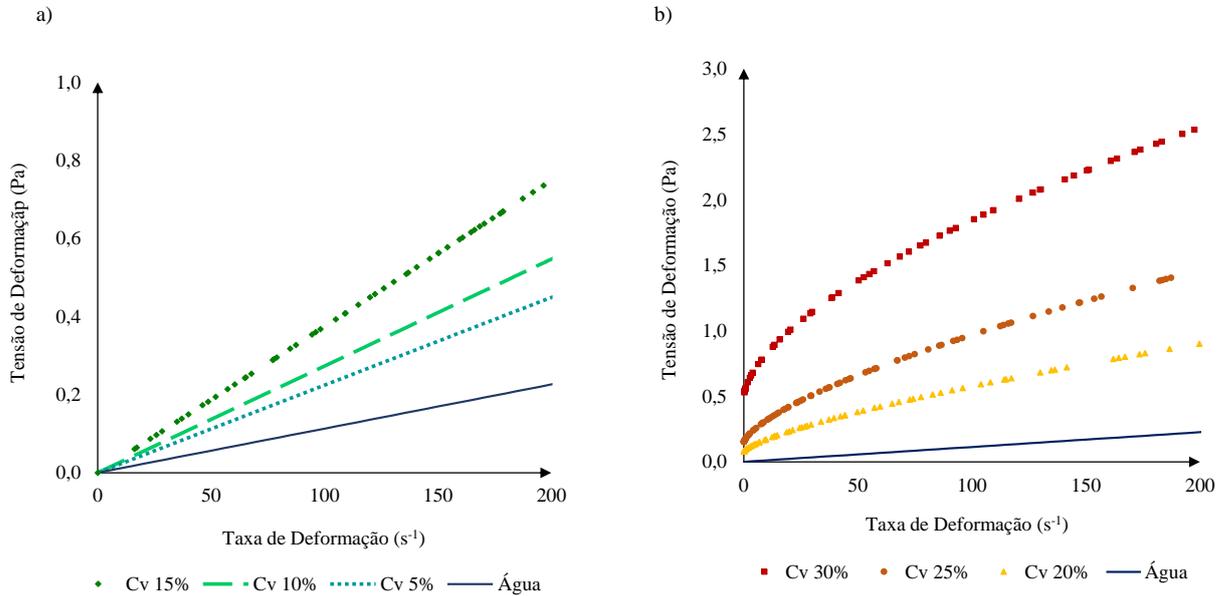


Tabela 12 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 25% de caulim e 75% de carvão

25% Caulim_75% Carvão					
Concentração Volumétrica (%)	Coefficiente de Viscosidade Dinâmico - μ	σ_0	k	n	R^2
30	-	0,1991	0,0312	0,7804	99,54
25	-	0,1060	0,0067	0,9362	98,80
20	0,00400	-	-	1	97,51
15	0,00304	-	-	1	98,80
10	0,00239	-	-	1	99,47
5	0,00184	-	-	1	97,11
Água	0,00011	-	-	1	98,33

Figura 24 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 25% de caulim e 75% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10, 15 e 20% b) concentração volumétrica de 25 e 30%

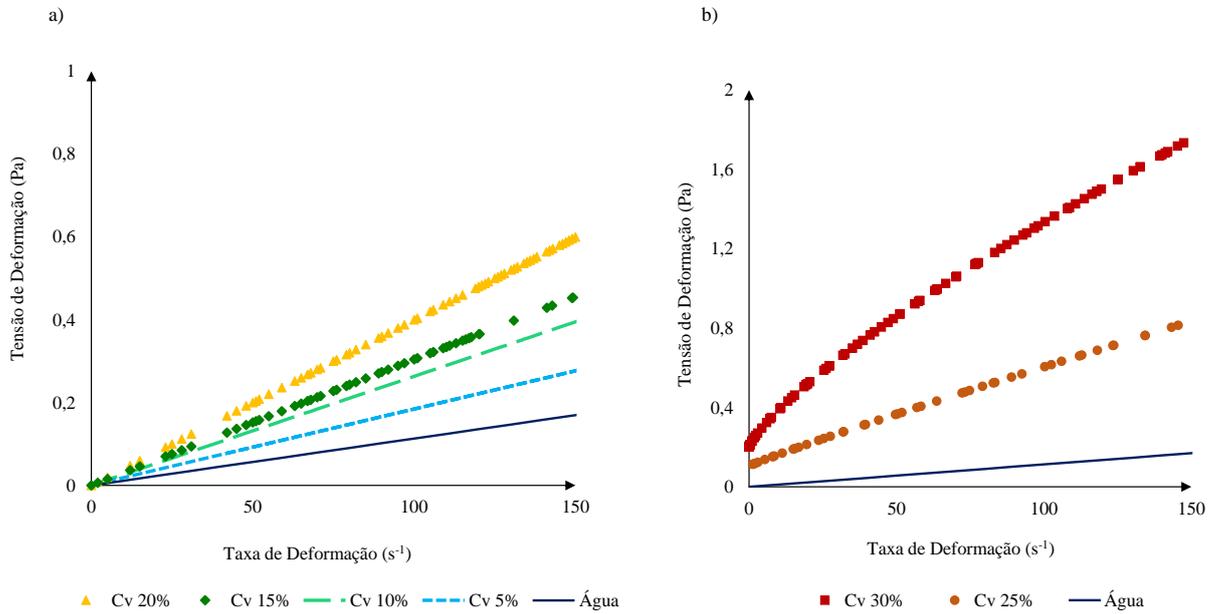
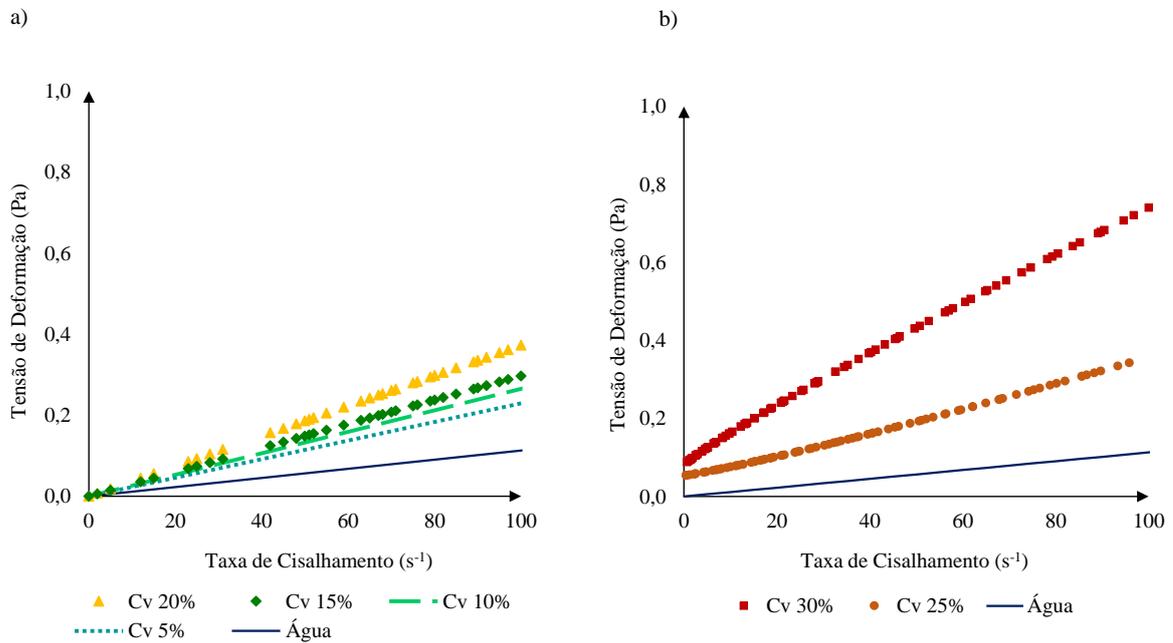


Tabela 13 – Resultados estatísticos obtidos do ajuste dos modelos reológicos para a mistura com 15% de caulim e 85% de carvão

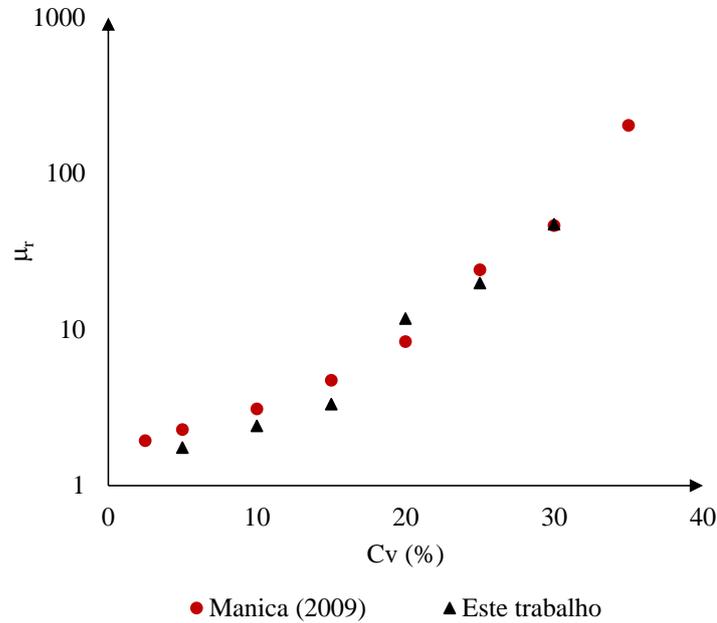
15% Caulim_85% Carvão					
Concentração Volumétrica (%)	Coefficiente de Viscosidade Dinâmico - μ	σ_0	k	n	R ²
30	-	0,1777	0,5550	0,2669	97,42
25	-	0,1244	0,0403	0,6168	96,87
20	0,00373	-	-	1	98,43
15	0,00280	-	-	1	99,67
10	0,00218	-	-	1	99,33
5	0,00151	-	-	1	99,61
Água	0,00011	-	-	1	98,33

Figura 25 – Relação entre tensão de cisalhamento e deformação para as misturas com 15% de caulim e 85% de carvão: a) concentração volumétrica de 5, 10, 15 e 20% b) concentração volumétrica de 25 e 30%



Foram comparados os resultados de Manica (2009) para uma mistura com idêntica proporção de sedimentos (50% caulim e 50% esfera de vidro) com os dados deste trabalho para uma mistura com 50% de caulim e 50% de carvão. A análise da figura 26 mostra que há uma coerência entre os dados, sendo possível afirmar que, independentemente do tipo de *spindle* utilizado, houve uma similaridade entre os valores, com um coeficiente de correlação de 98,94%. O resultado também sugere, que a presença do caulim em proporção idêntica ao material não coesivo, é o elemento que mais interfere na mudança das propriedades físicas do fluido de mistura de água e sedimento.

Figura 26 – Dados de viscosidade relativa em função da concentração volumétrica relativo à mistura 50% caulim e 50% esfera de vidro de Manica (2009) e 50% caulim e 50% carvão deste trabalho



5.6 COMPORTAMENTO REOLÓGICO

O ajuste do comportamento reológico das misturas aos modelos de Newton e Herschel-Bulkley apresentaram um valor alto para o coeficiente de determinação ($R^2 > 96,51\%$), indicando que há uma coerência dos valores. Quanto à influência da variação da concentração volumétrica, nota-se que um aumento da mesma ocasiona a mudança do comportamento das misturas de Newtoniano para um comportamento mais complexo conforme o modelo de Herschel-Bulkley. O aumento da viscosidade com a concentração pode ser atribuído ao aumento da frequência de interações entre partículas, devido à diminuição da quantidade de água entre as mesmas.

A proporção de sedimentos relativo à quantidade total de material colocado na mistura, também tem influência na mudança de comportamento. É possível ver na tabela 14 que, para as amostras com 100 e 85% de caulim, essa transição ocorre para uma concentração na faixa de 10 a 15%. Para uma proporção de 75 e 50% de caulim, a transição ocorre para uma concentração volumétrica de 15 a 20%; para a proporção de 25 e 15% de caulim, a transição ocorre para uma concentração de 20 a 25%; e, por fim, para a mistura com 100% de carvão, a

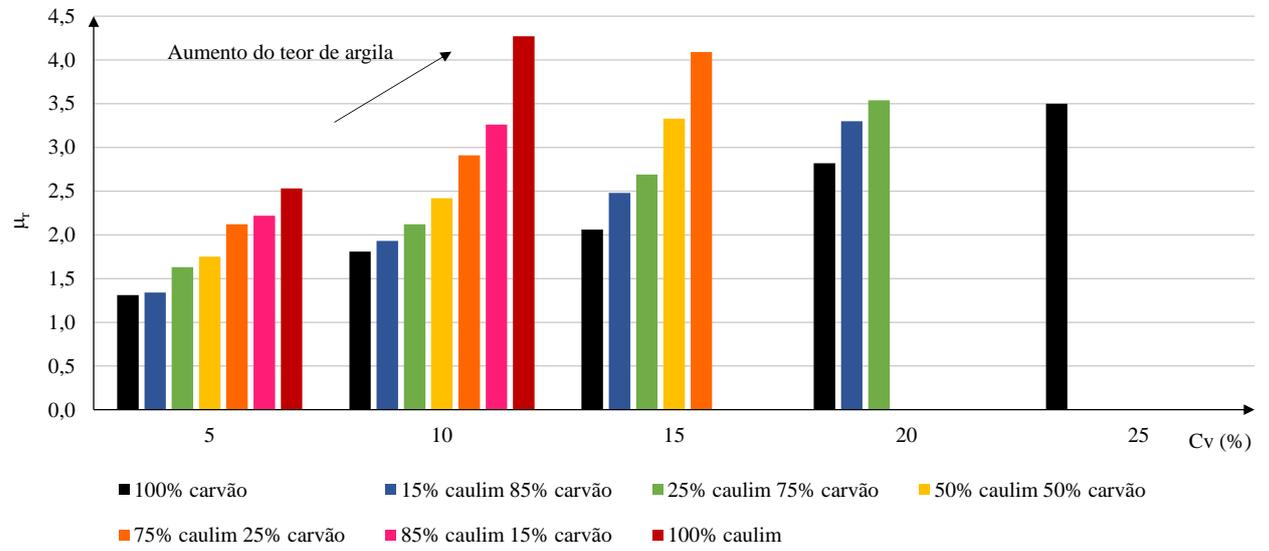
mudança de comportamento ocorre em uma faixa de concentração ainda mais alta, de 25 a 30%. Partículas não coloidais (carvão) são principalmente influenciadas por interações hidrodinâmicas sem a atuação de forças adicionais que surgem a partir de forças eletrostáticas, o que é justamente significativo para partículas coloidais (argila). Isto resulta em diferenças na reologia de suspensões coloidais e não coloidais: a mistura com carvão apresenta um comportamento Newtoniano para uma ampla gama de concentrações volumétricas, mas suspensões coloidais desenvolvem um comportamento não Newtoniano com uma concentração volumétrica muito mais baixa.

Tabela 14 – Viscosidade relativa (viscosidade dinâmica adimensionalizada pelo valor da água pura) em função da concentração volumétrica e da porcentagem de caulim

Composição da Mistura		Concentração Volumétrica (%)				
% Caulim	% Carvão	5	10	15	20	25
100	0	2,53	4,27			
85	15	2,22	3,26			
75	25	2,12	2,91	4,09		
50	50	1,75	2,42	3,33		
25	75	1,63	2,12	2,69	3,54	
15	85	1,34	1,93	2,48	3,30	
0	100	1,31	1,81	2,06	2,82	3,50
Água		1				

No gráfico da figura 27 pode-se visualizar a relação direta entre o teor de argila e a viscosidade relativa. Nota-se que a diferença de viscosidade relativa entre as misturas aumenta conforme aumenta a concentração volumétrica desse sedimento. Devido as suas características físicas, as partículas de caulim se unem, constituindo flocos com água aprisionada em seu interior, que, por sua vez, não está disponível para o escoamento, de modo que a suspensão se comporta como se a concentração volumétrica de sólidos fosse maior. Por essa razão, a viscosidade relativa de suspensões em que a quantidade de caulim é maior, é mais elevada.

Figura 27 – Gráfico da viscosidade relativa em função da concentração volumétrica para diferentes proporções de caulim e carvão



6 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE VISCOSIDADE

Para suspensões diluídas a viscosidade relativa depende somente da concentração de sedimentos apresentando um comportamento Newtoniano, contudo, para altas concentrações, quando as interações hidrodinâmicas e de contato se tornam relevantes, a viscosidade tende ao infinito e a concentração de sólidos se aproxima da máxima fração de empacotamento das partículas. Muitos dos modelos encontrados na literatura para estimar a viscosidade relativa utilizam o parâmetro da máxima fração de empacotamento na sua formulação. Por essa razão, no próximo item será apresentada a determinação da máxima fração de empacotamento das misturas ensaiadas, cujos valores foram usados posteriormente no cálculo para estimar a viscosidade relativa dessas suspensões.

6.1 DETERMINAÇÃO DA MÁXIMA FRAÇÃO DE EMPACOTAMENTO

A máxima fração de empacotamento (ϕ_{\max}) foi estimada por meio do ajuste dos resultados experimentais utilizando o método gráfico de Liu (2000), o qual permite prever a máxima fração de empacotamento para diferentes condições de cisalhamento. Como pode ser visto na figura 28, a máxima fração de empacotamento pode ser facilmente determinada por meio da extrapolação dos dados via plotagem $1-\mu_r^{-1/2}$ versus a concentração (ϕ), de modo que a máxima fração de empacotamento é o valor da concentração que corresponde ao valor unitário de $1-\mu_r^{-1/2}$. Na tabela 15 se encontram os valores da máxima fração de empacotamento encontrados.

Figura 28 – Viscosidade relativa da suspensão ($1-\mu_r^{-1/2}$) em função da concentração volumétrica (ϕ)

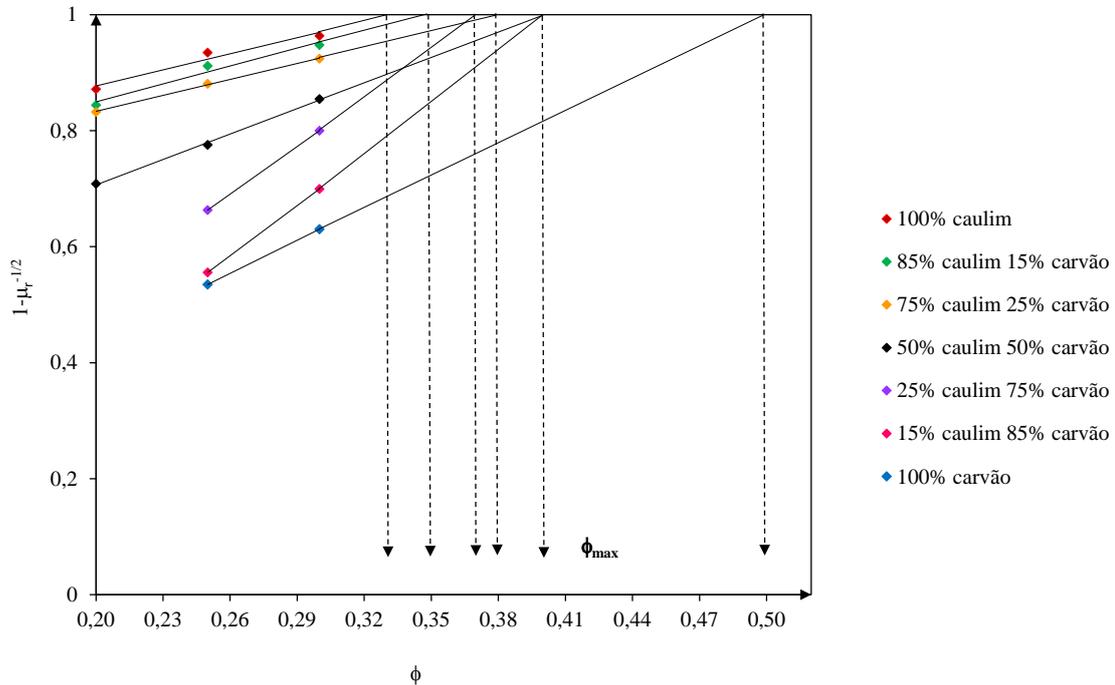


Tabela 15 – Valores de máxima fração de empacotamento (ϕ_{max}) estimados pelo método de Liu (2000)

Mistura	ϕ_{max}
100% Caulim	0,33
85% Caulim 15% Carvão	0,35
75% Caulim 25% Carvão	0,38
50% Caulim 50% Carvão	0,40
25% Caulim 75% Carvão	0,37
15% Caulim 85% Carvão	0,40
100% Carvão	0,50

Como pode ser observado pelos valores na tabela 15, conforme a mistura tem mais caulim, há uma tendência na diminuição do valor da máxima fração de empacotamento. Isso se deve, em parte, às propriedades físicas do caulim; visto ser uma partícula não esférica, os espaços entre as partículas não são bem ocupados.

Os resultados condizem com o relatado na literatura: Beruto et al. (2009) encontraram valores de máxima fração de empacotamento para suspensões de caulim que variaram de 0,29 a 0,33 e Turian et al. (2002), para suspensões de carvão, encontraram valores entre 0,485 e 0,600.

6.2 DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE POR MEIO DAS EQUAÇÕES ANALÍTICAS

Diante da variedade de modelos que se encontra na literatura para estimar a viscosidade, sete modelos foram escolhidos (tabela 16) em virtude das diferentes formas de abordagem e concepção (de modo experimental e/ou analítico) e de aplicação (para baixas e/ou altas concentrações).

Tabela 16 – Diferentes modelos para estimar a viscosidade e suas principais aplicações

Modelo	Equação	Abordagem ^a	Coefficientes dos Modelos	Principais Aplicações
Maron e Pierce (1956)	$\mu_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)^{-2}$	III	ϕ_{\max}	Baixas e altas concentrações
Krieger e Dougherty (1959)	$\mu_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)^{-[\mu]\phi_{\max}}$	II	$[\mu] = 2.5; \phi_{\max}$	Baixas e altas concentrações
Chong et al. (1971)	$\mu_r = \left[1 + k \frac{\phi/\phi_{\max}}{1 - \phi/\phi_{\max}}\right]^2$	III	$\phi_{\max}; k^b$	Baixas e altas concentrações; $\phi < 45\%$
Batchelor e Green (1972)	$\mu_r = 1 + [\mu]\phi + k\phi^2$	I	$[\mu] = 2.5; 4.2 < k < 6.2$	$2\% < \phi < 10\%$
Santamaría-Holek (2010)	$\mu_r = (1 - \phi_{ef})^{-[\mu]}; \phi_{ef} = \frac{\phi}{1 - [(1 - \phi_{\max})\phi/\phi_{\max}]}$	I	$[\mu] = 2.5; \phi_{\max}$	Baixas e altas concentrações
Browers (2010)	$\mu_r = \left(\frac{1 - \phi}{1 - \phi/\phi_{\max}}\right)^{([\mu]\phi_{\max})(1 - \phi_{\max})}$	I	$[\mu] = 2.5; \phi_{\max}$	Baixas concentrações
Horri et al. (2011)	$\mu_r = 1 + [\mu]\phi + k\phi\left(\frac{\phi}{\phi_{\max} - \phi}\right)$	II	$[\mu] = 2.5; \phi_{\max}; k^b$	Baixas e altas concentrações; $\phi < 40\%$

^a I: Teórica, II: Experimental, III: Teórica e experimental.

^b Pode ser determinado experimentalmente via ajuste de dados.

A escala logarítmica nas figuras apresentadas a seguir foi usada para mostrar o contraste entre os diferentes modelos. O modelo de Chong foi utilizado como referência e a linha amarela tracejada representa uma variação de $\pm 15\%$ do valor da viscosidade estimado pela equação de Chong et al. (1971), pois esse modelo foi o que mais se aproximou dos valores de viscosidade obtidos experimentalmente. Os dados de viscosidade relativa com comportamento não Newtoniano (pontos em vermelho) se aproximam da curva do modelo de

Chong et al. (1971) à medida que diminui a quantidade de caulim presente na mistura. Uma vez que o modelo de Chong foi idealizado para partículas esféricas, a proximidade dos valores referidos é coerente, pois a forma do carvão é semiangular e semiarredondada (MANICA, 2002). Com relação ao comportamento Newtoniano (pontos em azul), apesar dos valores de viscosidade para a mistura com 100% de caulim (figura 29) apresentar uma boa estimativa com a equação de Chong et al. (1971), a tendência observada é a de que os valores de viscosidade se afastam da curva do modelo para as misturas com até 50% de caulim (figuras 29, 30, 31 e 32).

Figura 29 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 100% caulim e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica. (linha tracejada em amarelo: variação de $\pm 15\%$ com relação ao modelo de Chong et al. (1971))

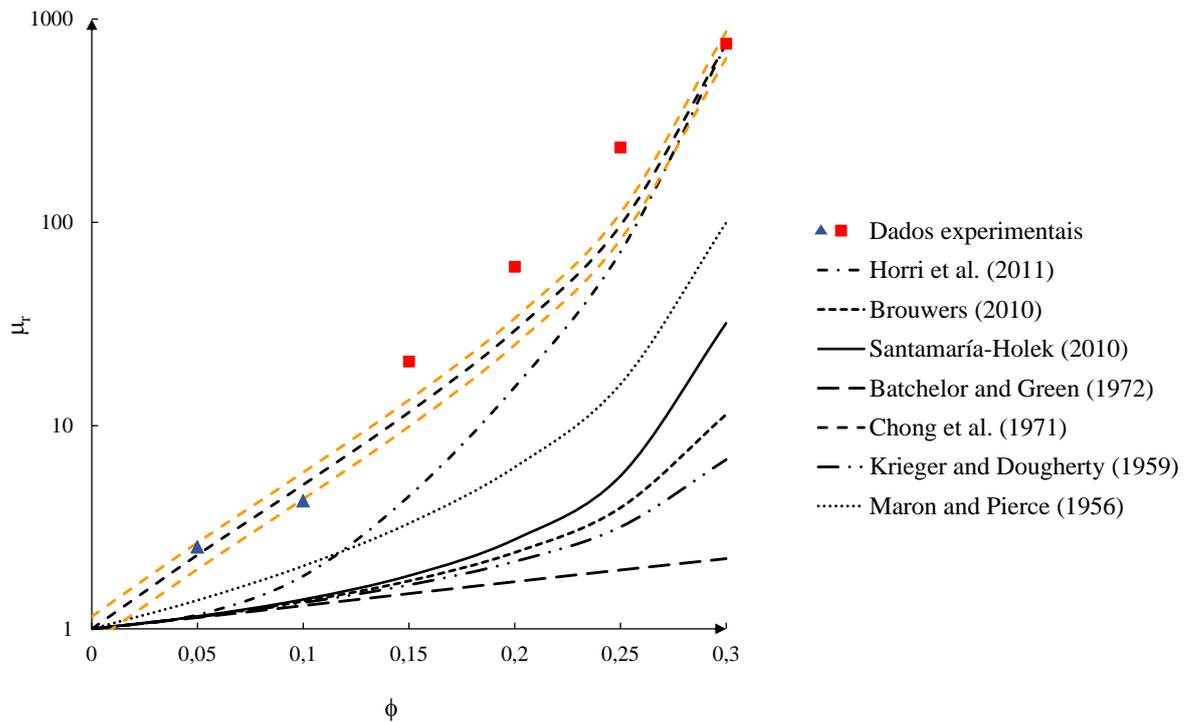


Figura 30 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 85% caulim 15% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica. (linha tracejada em amarelo: variação de $\pm 15\%$ com relação ao modelo de Chong et al. (1971))

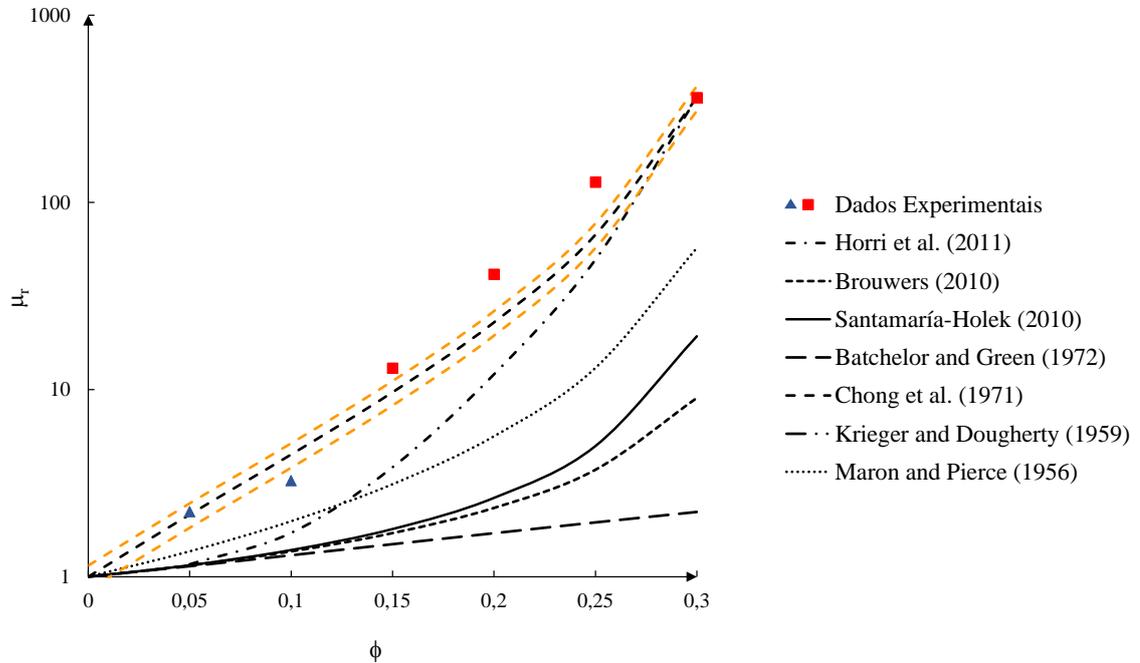


Figura 31 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 75% caulim 25% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica. (linha tracejada em amarelo: variação de $\pm 15\%$ com relação ao modelo de Chong et al. (1971))

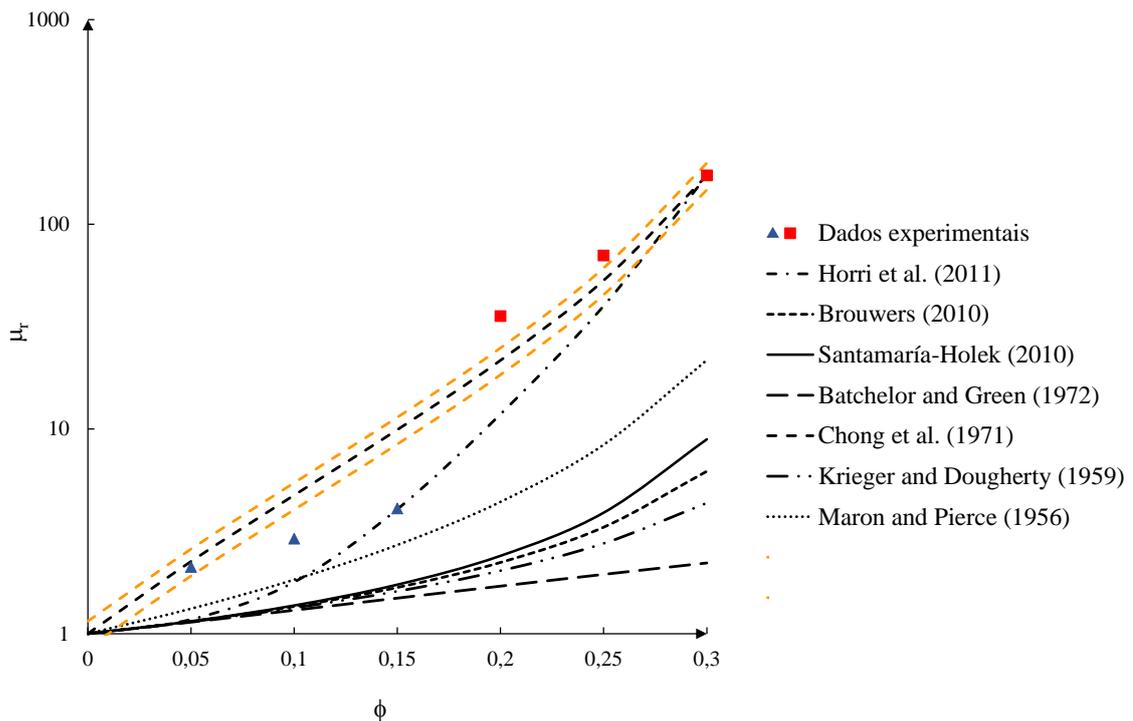
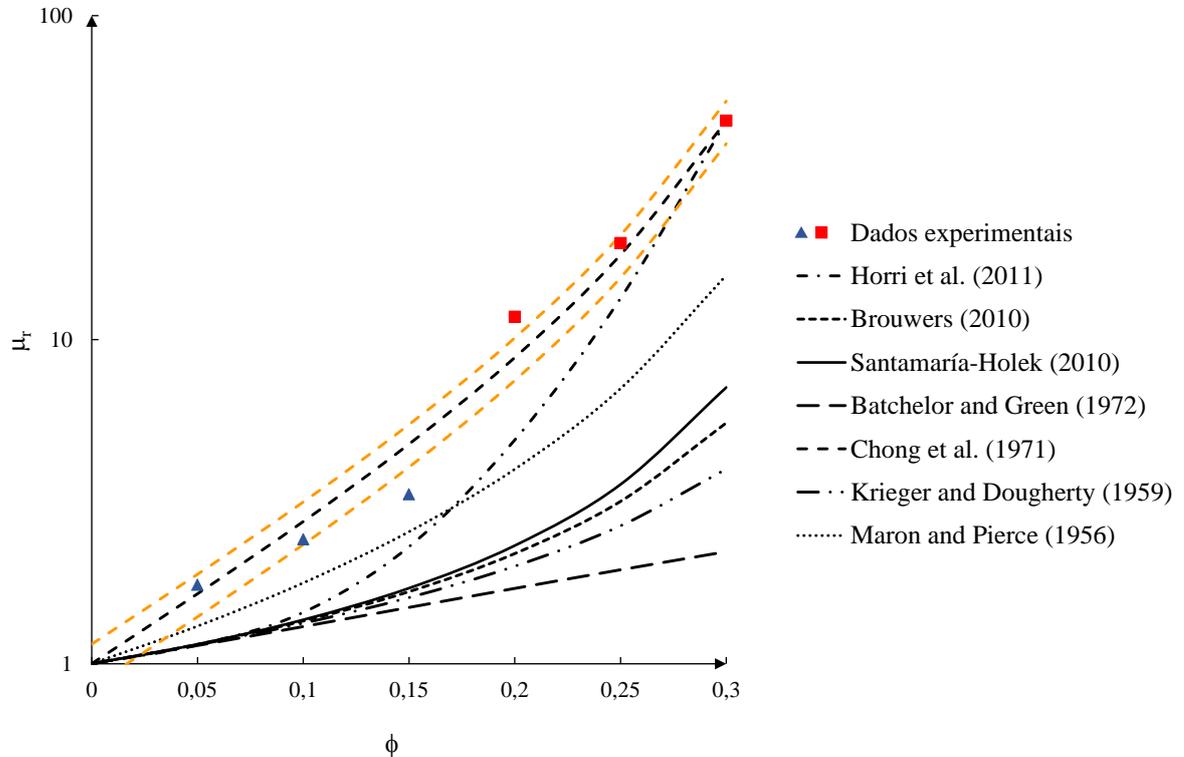


Figura 32 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 50% caulim 50% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica. (linha tracejada em amarelo: variação de $\pm 15\%$ com relação ao modelo de Chong et al. (1971))



Quando a proporção de carvão é mais significativa na mistura ($\geq 75\%$), conforme pode ser visualizado nas figuras 33, 34 e 35 os valores de viscosidade relativa das misturas se aproximam não só do modelo de Chong et al. (1971) como também do modelo de Maron e Pierce (1956), ambos idealizados para partículas esféricas.

Figura 33 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 25% caulim 75% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica

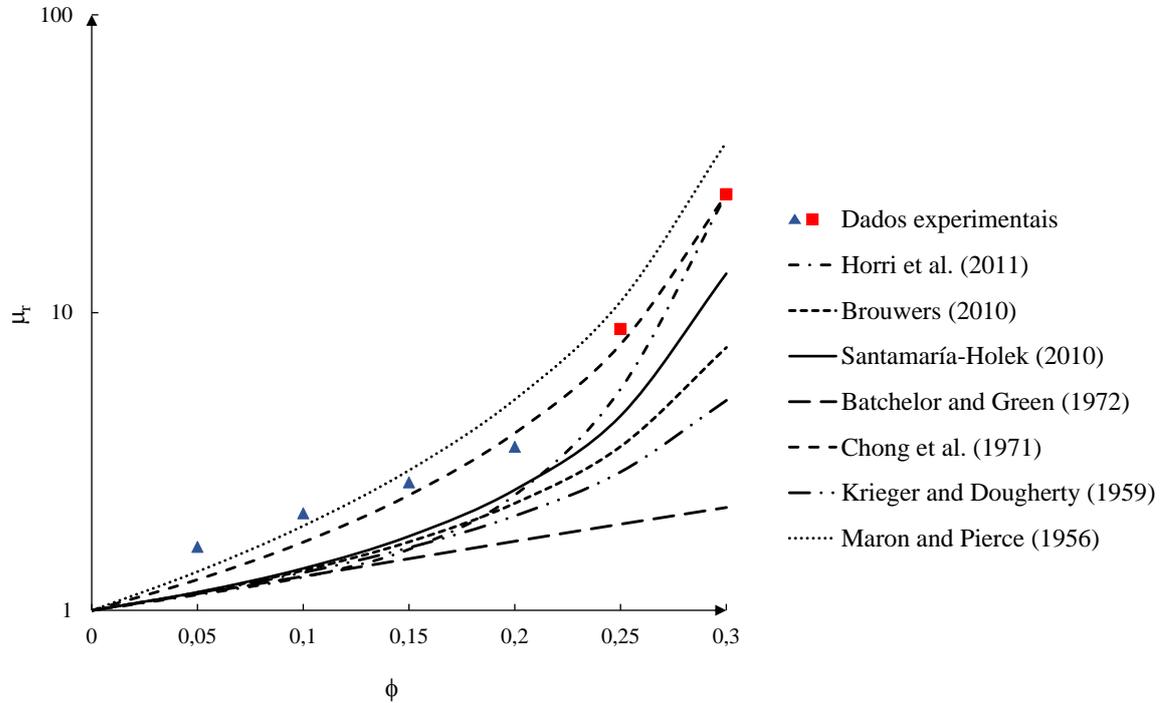


Figura 34 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 15% caulim 85% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica

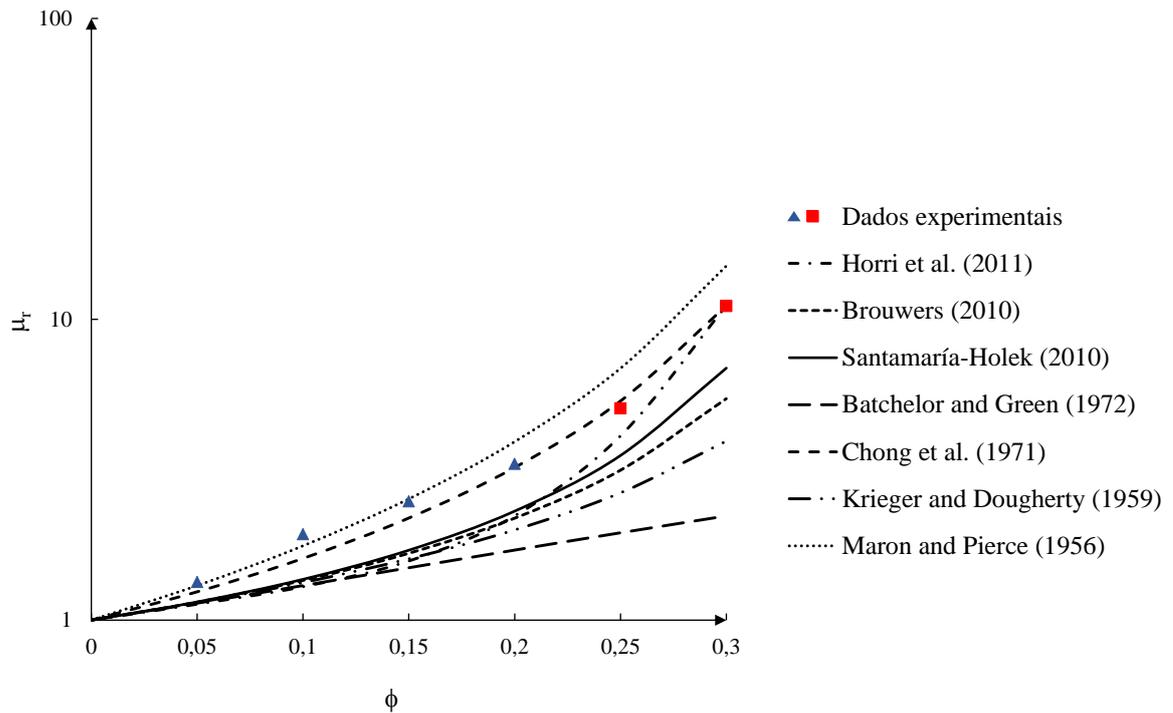
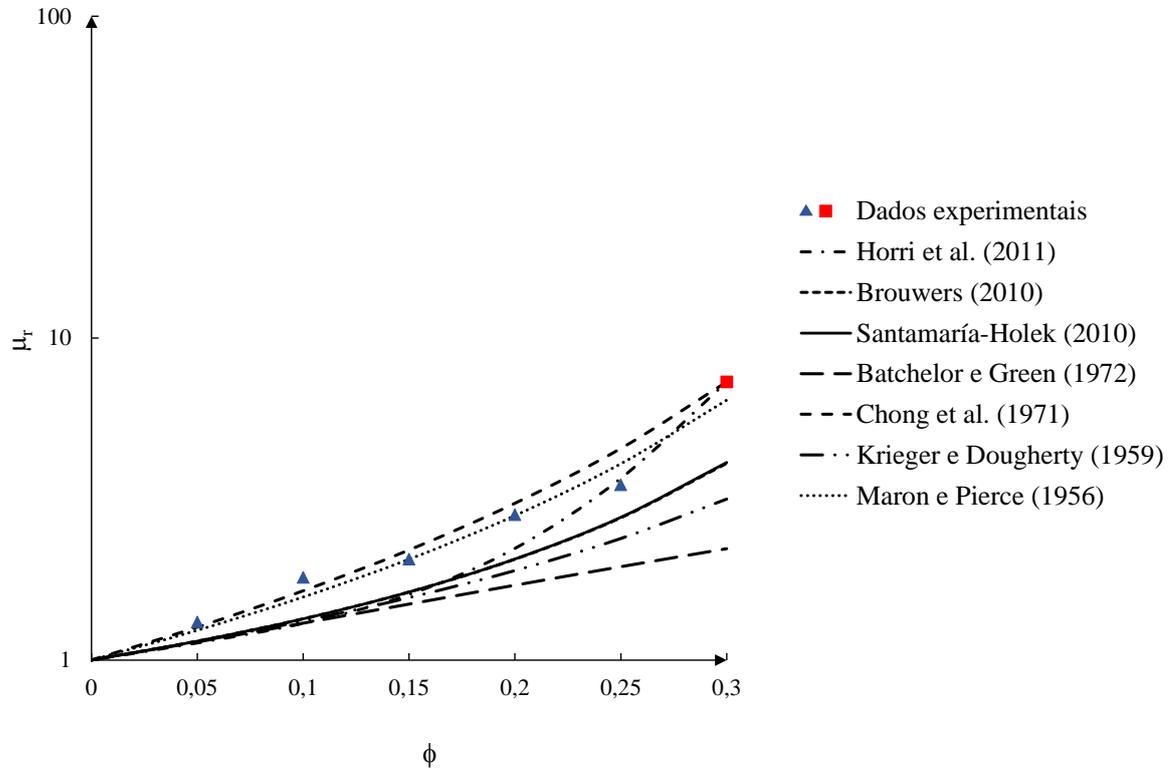


Figura 35 – Dados experimentais de viscosidade relativa da mistura com 100% carvão e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica



Como as equações aplicadas e apresentadas na tabela 15 não foram suficientes para descrever o comportamento reológico de algumas das misturas ensaiadas, no capítulo que segue é proposto um modelo para determinar a viscosidade relativa em função de três parâmetros: a concentração volumétrica de cada sedimento presente na mistura, a máxima fração de empacotamento e a porcentagem de argila.

6.3 MODELO DE EQUAÇÃO EMPÍRICA PARA ESTIMAR A VISCOSIDADE

Em geral, os modelos para prever a viscosidade relativa em função da concentração de partículas consideram como os mesmos se comportam com uma baixa e alta concentração volumétrica. O limite para uma alta concentração é dado pela fórmula 30, que demonstra que a viscosidade relativa de uma suspensão tende ao infinito quando a concentração de sedimentos se aproxima da máxima fração de empacotamento.

$$\lim_{\phi \rightarrow \phi_{\max}} \mu_r = \infty \quad (\text{fórmula 30})$$

Considerando uma suspensão com baixa concentração volumétrica, no seu limite, isto é, para concentrações volumétricas próximas de zero, a viscosidade relativa de uma suspensão, é usualmente suposta como obedecendo a relação proposta por Einstein (fórmula 31). A fórmula 32 demonstra que, nessa condição, a viscosidade relativa deve se aproximar de 1.

$$\mu_r = 1 + [\mu]\phi \quad (\text{fórmula 31})$$

$$\lim_{\phi \rightarrow 0} \mu_r = 1 \quad (\text{fórmula 32})$$

Onde:

μ_r = viscosidade relativa;

ϕ = concentração volumétrica (%).

Contudo, vale lembrar que a viscosidade de uma mistura é uma propriedade intrínseca do material e o principal problema com os pressupostos anteriormente citados, é que eles não podem ser generalizados para todos os tipos de mistura, ou seja, a viscosidade de uma mistura de água e sedimento não pode ser uma função unicamente dependente da concentração volumétrica (PABST, 2004). Isso pode ser exemplificado com os resultados da caracterização reológica da mistura com presença apenas de caulim ou carvão (figura 27): para a mesma concentração volumétrica de sedimento, o caulim, devido suas propriedades coloidais, apresenta uma viscosidade maior que o carvão. Contudo, pode-se argumentar que, uma vez que são infinitas as correlações possíveis entre as características físicas de uma partícula (distribuição granulométrica, forma da partícula, etc.) e as várias interações com outros elementos da mistura, uma suspensão de água e sedimento é considerada qualitativamente com uma mistura de uma única fase, ou seja, uma matriz líquida contendo partículas sólidas

(COUSSOT, 1997). Contudo, mesmo nos casos em que outras características microestruturais são importantes, Pabst (2003) afirma que de uma forma rudimentar, a informação da forma da partícula está contida no coeficiente de Einstein, conhecido como viscosidade intrínseca com valor de 2,5 para esferas, mas pode alcançar outros valores para partículas mais achatadas. Da mesma forma, a informação da distribuição granulométrica e/ou arranjo das partículas está contido na máxima fração de empacotamento.

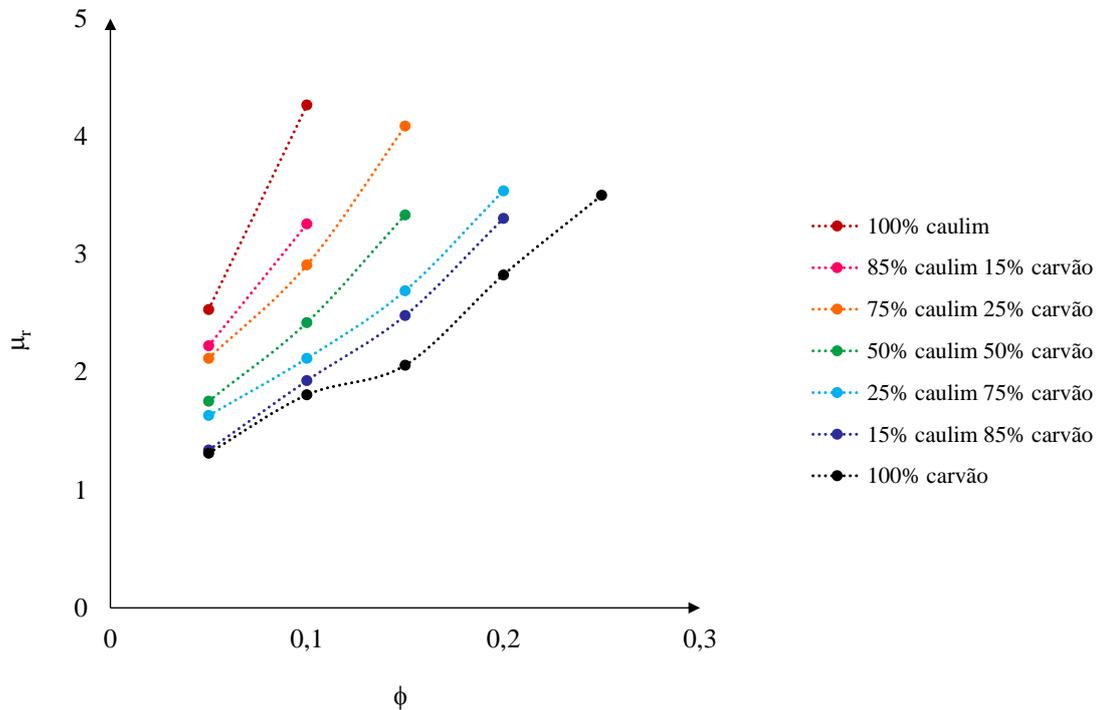
Uma vez que o caulim e o carvão apresentam massas específicas distintas, essa influência foi levada em questão na equação proposta por meio da elaboração de uma função que relacionou a concentração volumétrica de argila (ϕ_A) e o percentual de argila (%A) presente na mistura (fórmula 33), bem como entre a concentração volumétrica do carvão (ϕ_C) e o percentual de carvão (%C) na mistura (fórmula 34).

$$\phi_A = 0,892.(\%A)^{1,348} \quad (\text{fórmula 33})$$

$$\phi_C = 1,042.(\%C)^{0,674} \quad (\text{fórmula 34})$$

Considerando os dados das misturas que apresentaram um comportamento Newtoniano (figura 36), por meio de uma regressão múltipla ($R^2 > 93,74\%$) foi possível construir um modelo que descreve a relação entre concentração volumétrica de cada sedimento com a proporção de cada sedimento presente na mistura (fórmulas 33 e 34).

Figura 36 – Viscosidade relativa (μ_r) em função da concentração volumétrica (ϕ) para as misturas com comportamento Newtoniano

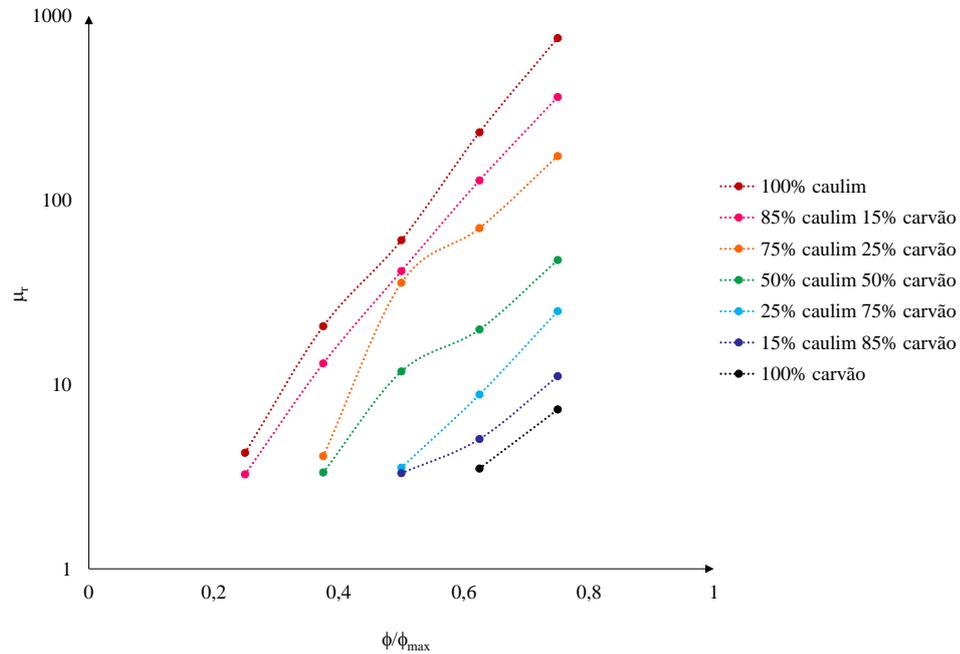


Assim, a equação para estimar a viscosidade relativa para suspensões com comportamento Newtoniano e diferentes concentrações de caulim e de carvão pode ser definida conforme a fórmula 35.

$$\mu_r = 1 + 31,53 \cdot \phi \cdot \phi_A + 9,43 \cdot \phi \cdot \phi_C \quad (\text{fórmula 35})$$

A respeito das misturas com comportamento não Newtoniano, conforme pode ser visto na figura 37, a relação entre a viscosidade relativa e a relação entre a concentração volumétrica e a máxima fração de empacotamento é definida conforme a fórmula 36.

Figura 37 – Viscosidade relativa (μ_r) em função do parâmetro ϕ/ϕ_{\max} para as misturas com comportamento não Newtoniano



$$\mu_r = a \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_{\max}} \right)^\beta \quad (\text{fórmula 36})$$

Realizando o processo de linearização das curvas conforme descrito abaixo.

- Aplica-se o logaritmo a ambos os lados da equação:

$$\log \mu_r = \log \left[a \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_{\max}} \right)^\beta \right] \quad (\text{fórmula 37})$$

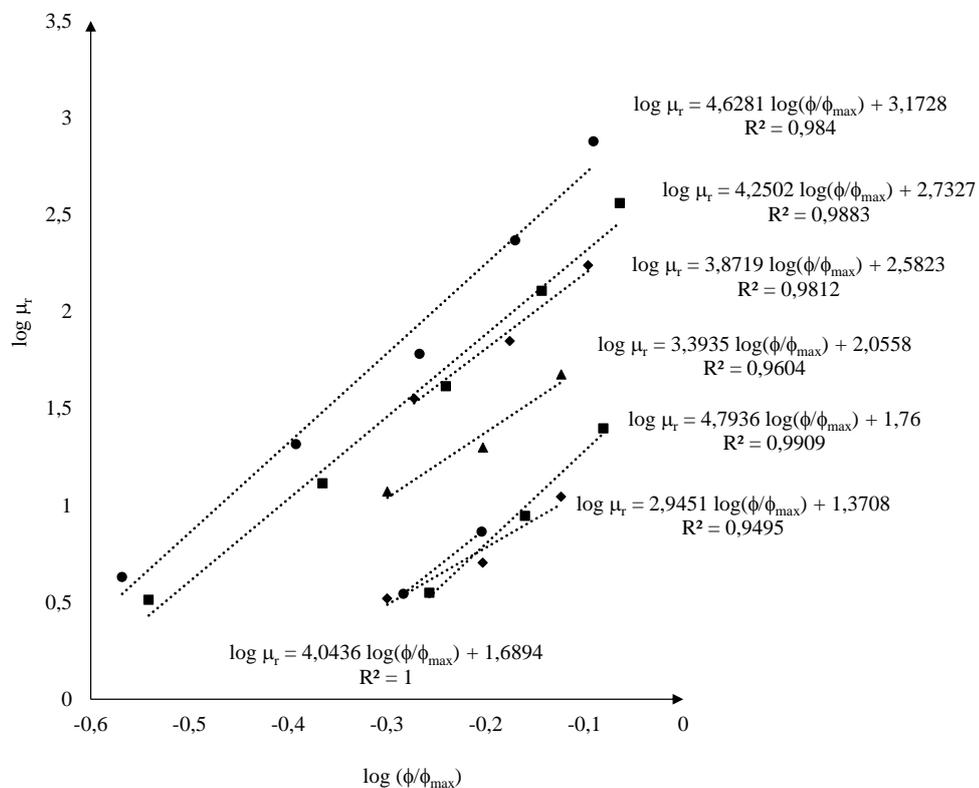
$$\log \mu_r = \log a + \beta \cdot \log \left(\frac{\phi}{\phi_{\max}} \right) \quad (\text{fórmula 38})$$

- Fazendo $\log \mu_r = \mu_r'$, $\log a = a'$ e $\log (\phi / \phi_{\max}) = (\phi / \phi_{\max})'$, obtém-se:

$$\mu_r' = a' + \beta \left(\frac{\phi}{\phi_{\max}} \right)' \quad (\text{f\u00f3rmula 39})$$

Ap\u00f3s aplicar o logaritmo em ambos os lados da equa\u00e7\u00e3o foi poss\u00edvel fazer um ajuste linear dos dados conforme pode ser visto na figura 38.

Figura 38 – Logaritmo da Viscosidade relativa em fun\u00e7\u00e3o do par\u00e2metro ϕ/ϕ_{\max} para as misturas com comportamento n\u00e3o Newtoniano

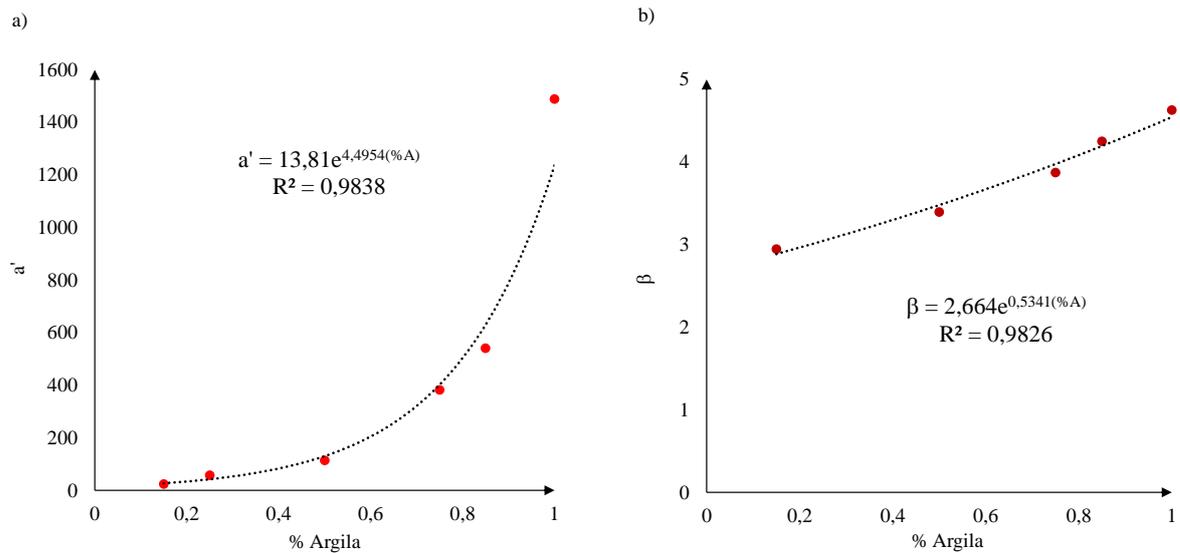


Os coeficientes angulares e lineares dessas retas est\u00e3o indicados na tabela 17 e s\u00e3o fun\u00e7\u00e3o da rela\u00e7\u00e3o (ϕ/ϕ_{\max}) e da porcentagem de argila presente na mistura, sendo β o coeficiente angular da reta (figura 34) e a pot\uancia que relaciona μ_r e (ϕ/ϕ_{\max}) (figura 33).

Com os dados da tabela 17, foi realizada uma regress\u00e3o dos dados (figura 39) e se pode explicitar a rela\u00e7\u00e3o $\mu_r = a.(\phi/\phi_{\max})^\beta$ (f\u00f3rmula 36).

Tabela 17 – Coeficientes linear (a') e angular (β) referente aos dados da figura 35

% Argila	a'	β
100	1488,7	4,6
85	540,4	4,3
75	382,2	3,9
50	113,7	3,4
25	57,5	-
15	23,5	2,9
0	-	-

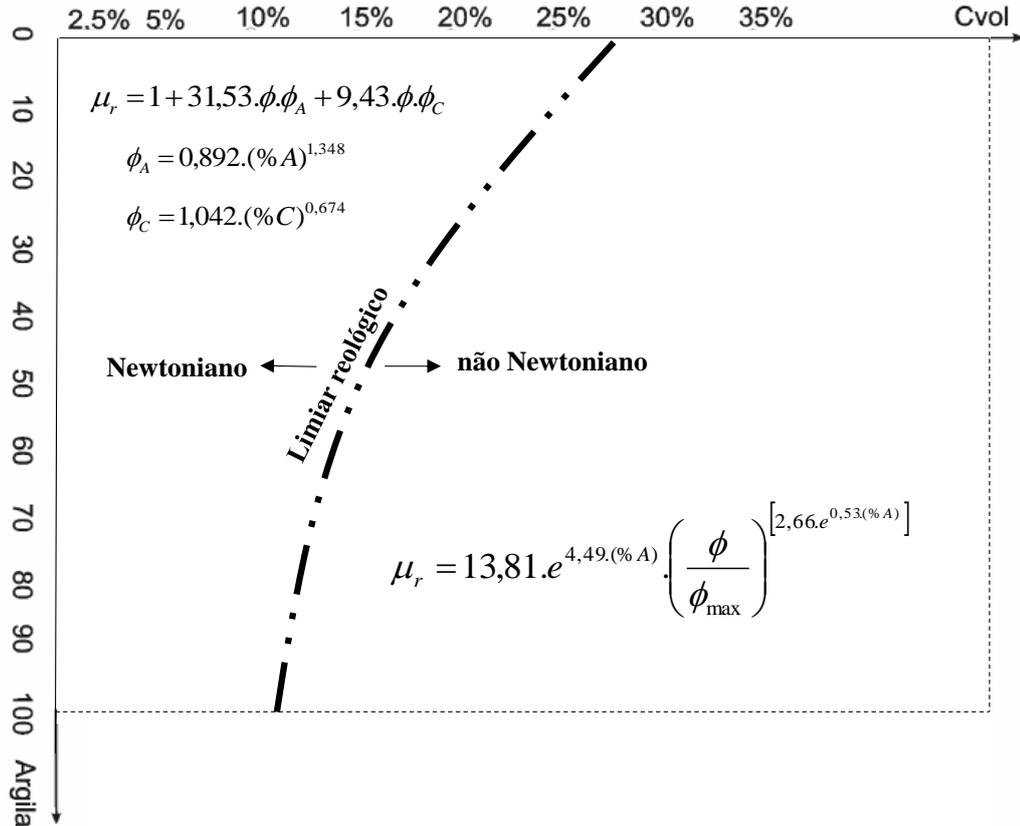
Figura 39 – a) Variação do parâmetro a' em função da % Argila e b) Variação do parâmetro β em função da % Argila

Reescrevendo a fórmula 39, a equação para estimar a viscosidade relativa para suspensões com comportamento não Newtoniano é definida conforme a fórmula 40.

$$\mu_r = 13,81.e^{4,49.(\% A)} \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_{\max}} \right)^{[2,66.e^{0,53.(\% A)}]} \quad (\text{fórmula 40})$$

O uso das equações propostas (35 e 40) para estimar a viscosidade relativa de misturas compostas de caulim e carvão é limitado às concentrações volumétricas e proporção de sedimento conforme indicadas no gráfico abaixo (figura 40).

Figura 40 – Equações propostas neste trabalho para determinar a viscosidade relativa de misturas compostas de caulim e carvão



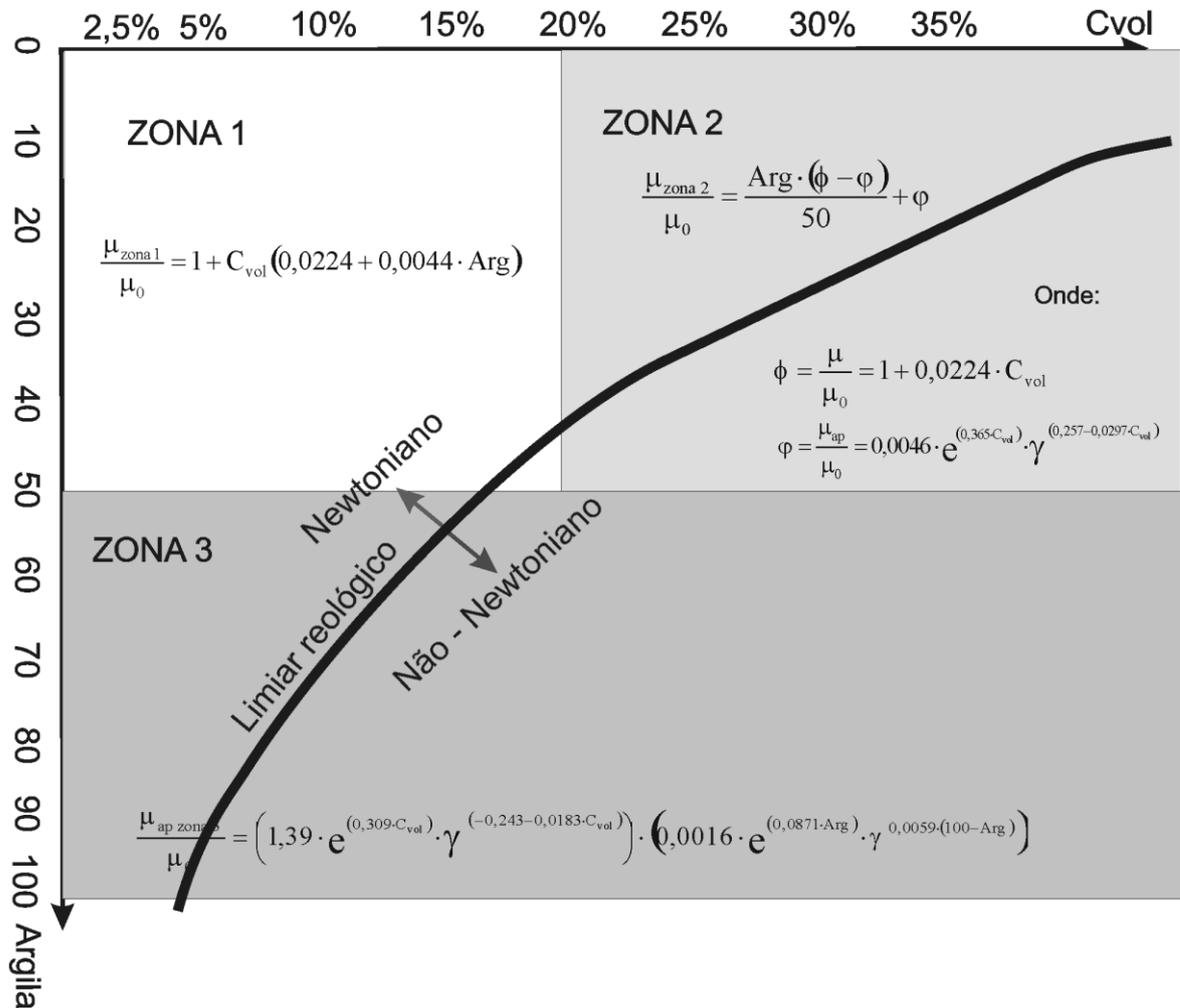
Uma comparação entre os valores da viscosidade relativa prevista pelas fórmulas 35 (cor de fundo laranja) e 40 (cor de fundo cinza) e os valores obtidos experimentalmente pode ser visualizada na tabela 18. Em vermelho, baixa ocorrência do erro relativo percentual ($> \pm 15\%$) demonstra que as fórmulas propostas podem estimar satisfatoriamente as misturas ensaiadas.

Tabela 18 – Valores de viscosidade relativa referente aos dados experimentais: estimado pela fórmula 35 (fundo laranja), fórmula 40 (fundo cinza) e o erro relativo percentual

Composição da Mistura		μ	Concentração Volumétrica (%)					
% Caulim	% Carvão		5	10	15	20	25	30
100	0	Dados Experimentais	2,53	4,27	20,69	60,59	233,28	756,54
		Equações Ajustadas	2,41	3,81	20,45	75,61	208,45	477,35
		Erro Relativo	-5%	-11%	-1%	25%	-11%	-37%
85	15	Dados Experimentais	2,22	3,26	12,99	41,23	127,96	362,50
		Equações Ajustadas	2,27	3,53	18,53	61,93	157,92	339,29
		Erro Relativo	2%	8%	43%	50%	23%	-6%
75	25	Dados Experimentais	2,12	2,91	4,09	35,61	70,45	173,35
		Equações Ajustadas	2,15	3,29	4,44	33,17	80,56	166,33
		Erro Relativo	1%	13%	9%	-7%	14%	-4%
50	50	Dados Experimentais	1,75	2,42	3,33	11,77	19,86	47,35
		Equações Ajustadas	1,86	2,72	3,58	11,86	25,78	48,61
		Erro Relativo	6%	12%	7%	1%	30%	3%
25	75	Dados Experimentais	1,63	2,12	2,69	3,54	8,82	24,98
		Equações Ajustadas	1,62	2,24	2,87	3,49	13,82	24,08
		Erro Relativo	-1%	6%	7%	-1%	57%	-4%
15	85	Dados Experimentais	1,34	1,93	2,48	3,30	5,06	11,08
		Equações Ajustadas	1,55	2,10	2,65	3,20	7,04	11,91
		Erro Relativo	16%	9%	7%	-3%	39%	8%
0	100	Dados Experimentais	1,31	1,81	2,06	2,82	3,50	7,32
		Equações Ajustadas	1,49	1,98	2,47	2,96	3,46	3,95
		Erro Relativo	14%	10%	20%	5%	-1%	-46%

Considerando o trabalho de Manica (2009), realizado com misturas de esferas de vidro e caulim, compararam-se os resultados experimentais deste autor com a viscosidade relativa estimada pelas 7 fórmulas da tabela 16 e pelas equações ajustadas neste trabalho. Com as equações para estimar a viscosidade relativa ajustadas pelo autor (figura 41), os valores de máxima fração de empacotamento foram determinados por meio do método gráfico de Liu (2000) para uma taxa de cisalhamento de 25 (s^{-1}).

Figura 41 – Equações utilizadas para determinar a viscosidade relativa de misturas compostas de caulim + esfera de vidro (MANICA, 2009)



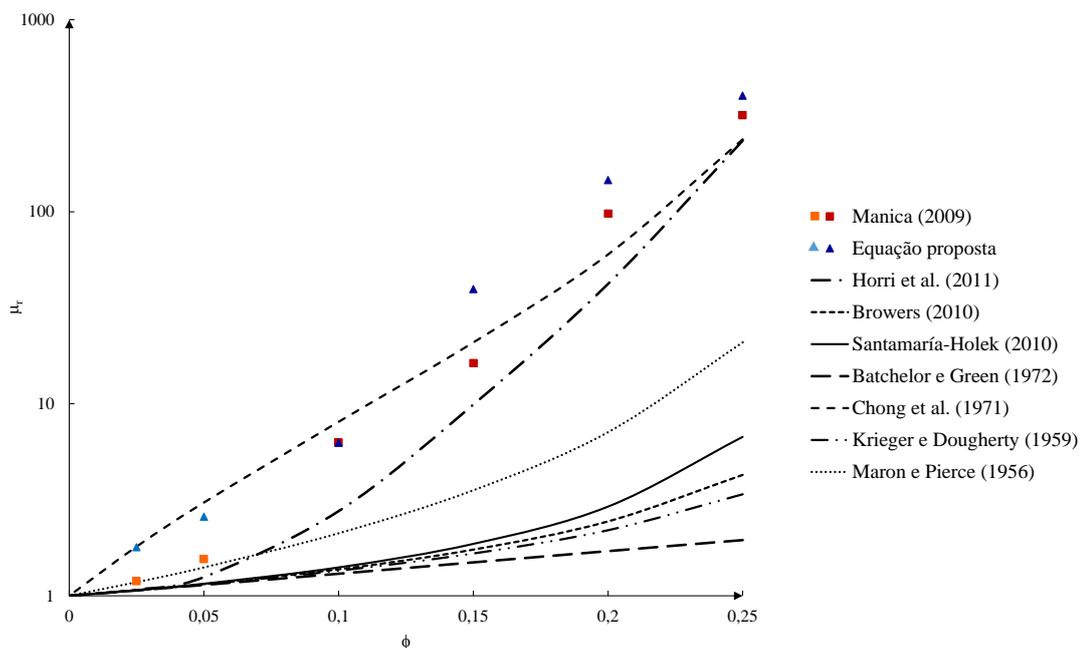
Como pode ser observado na tabela 19, o resultado de 0,32 encontrado para a máxima fração de empacotamento da mistura de caulim é condizente com o valor encontrado neste trabalho (0,33) e com o relatado na literatura (0,29 a 0,33) (BERUTO et al., 2009). A mesma tendência de comportamento observada com as misturas utilizadas neste trabalho é constatada nas misturas de Manica (2009): da diminuição do valor da máxima fração de empacotamento com o aumento da quantidade de caulim na mistura. Por fim, o valor de 0,62 encontrado para a mistura de esfera de vidro é coerente com o valor de 0,605 encontrado na literatura (BARNES et al, 1993)

Tabela 19 – Valores de máxima fração de empacotamento (ϕ_{\max}) estimados pelo método de Liu (2000) para diversas proporções de caulim e esfera de vidro

Mistura	ϕ_{\max}
100% Caulim	0,32
85% Caulim 15% Esfera de vidro	0,34
75% Caulim 25% Esfera de vidro	0,37
50% Caulim 50% Esfera de vidro	0,48
25% Caulim 75% Esfera de vidro	0,60
15% Caulim 85% Esfera de vidro	0,58
100% Esfera de vidro	0,62

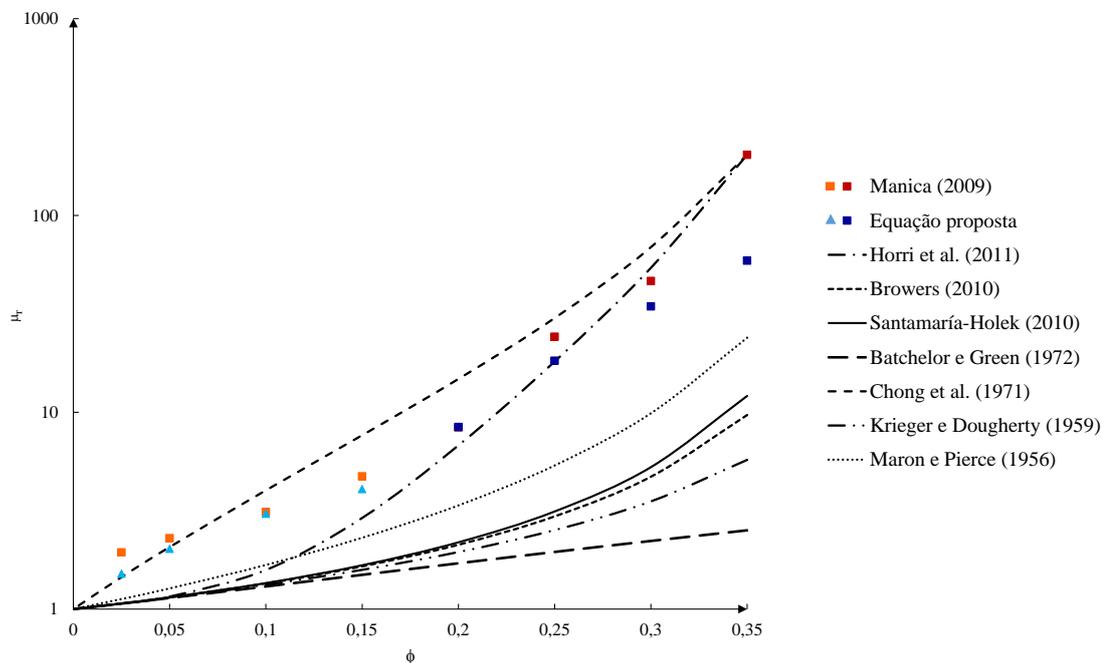
Como pode ser verificado na figura 42, para a mistura com 100% de caulim, a fórmula de Maron e Pierce (1956) estimou satisfatoriamente a viscosidade para o caso das misturas com comportamento Newtoniano (pontos em laranja) e a equação de Chong et al. (1971), representou bem os dados com comportamento não Newtoniano (pontos em vermelho). Já as equações propostas neste trabalho estimam valores de viscosidade mais elevados em relação aos dados do autor.

Figura 42 – Dados experimentais da mistura com 100% de caulim (MANICA, 2009) e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica



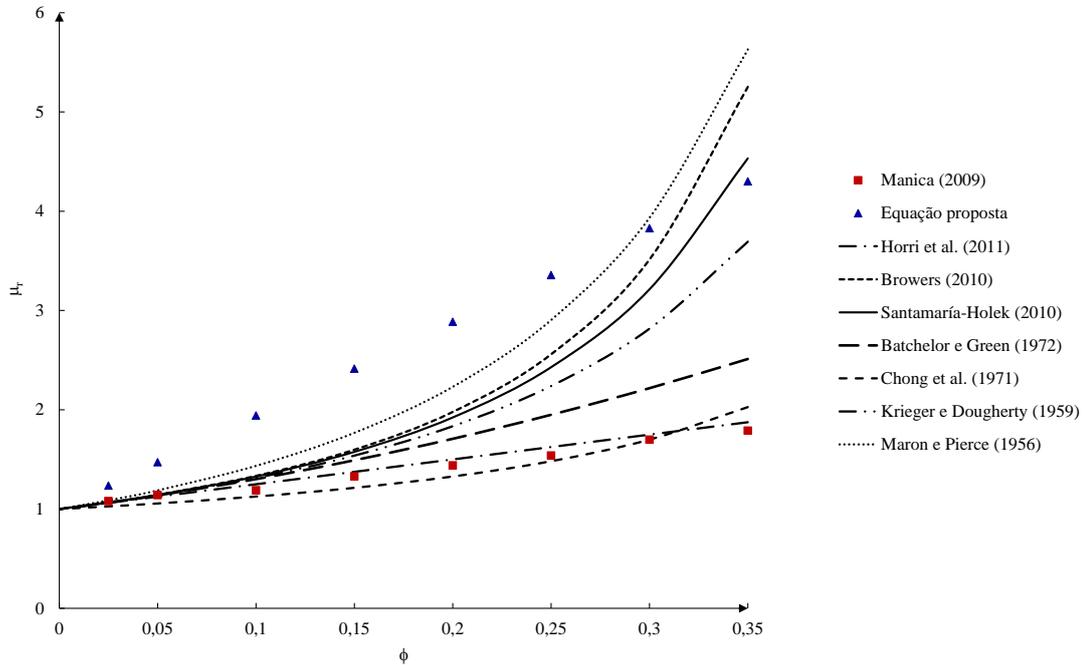
Para a mistura de 50% de caulim e 50% de esfera de vidro, nas concentrações que apresentaram um comportamento Newtoniano (pontos em laranja), a equação proposta neste trabalho foi a que melhor estimou os valores de viscosidade relativa (figura 43). Já a viscosidade das misturas com comportamento não Newtoniano (pontos em vermelho) pode ser estimada tanto pela equação de Horri et al. (2011), quanto pela equação proposta neste trabalho.

Figura 43– Dados experimentais da mistura com 50% de caulim e 50% de esfera de vidro (MANICA, 2009) e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica



Por fim, para as misturas com presença de apenas esfera de vidro (figura 44), o modelo de Chong et al. (1971) e Horri et al. (2011) fornecem um bom ajuste de dados para concentrações volumétricas menores que 35%. Já as equações propostas neste trabalho superestimam as viscosidades das misturas.

Figura 44 – Dados experimentais da mistura com 100% de esfera de vidro (MANICA, 2009) e viscosidade relativa estimada por diferentes modelos em função da concentração volumétrica



A análise comparativa dos dados demonstra que as equações propostas neste trabalho não puderam prever satisfatoriamente a viscosidade relativa para todas as misturas de Manica (2009). Suspensões particuladas são sistemas complexos que podem ser ainda mais, conforme a natureza física das partículas que as compõem. O fato da viscosidade ser uma propriedade intrínseca do material, demonstra a importância da representatividade de outros parâmetros físicos, com por exemplo, a forma da partícula, e das interações entre os vários componentes em um modelo para estimar a viscosidade relativa de suspensões.

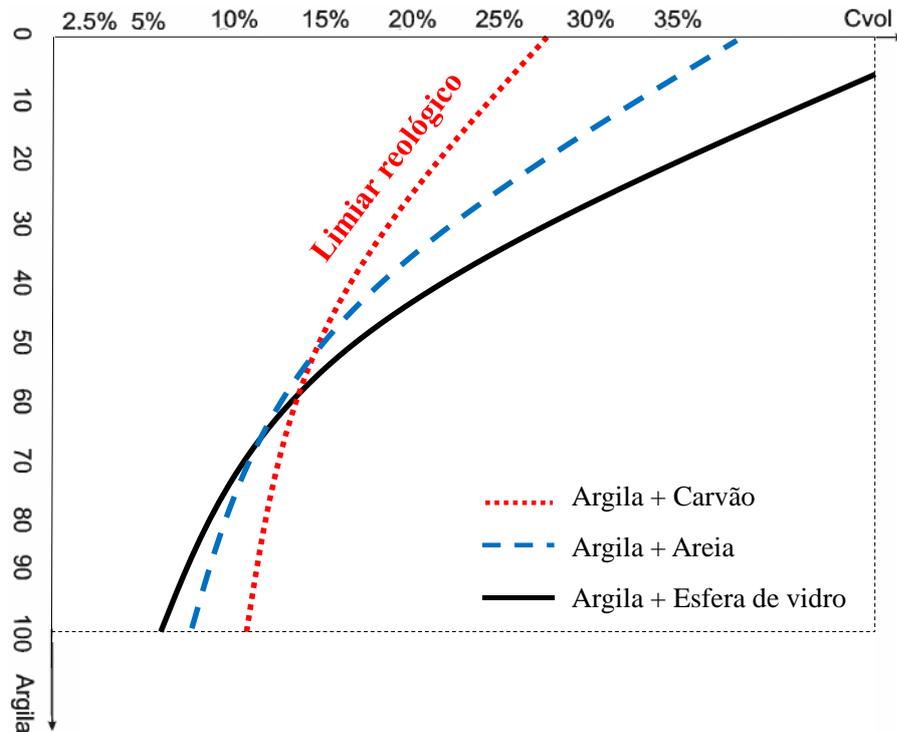
7 DISCUSSÃO

Há muitas vantagens no estudo do comportamento de uma corrente de turbidez em escala reduzida, pois além de transpor a dificuldade em monitorar *in loco* esse escoamento, que ocorre em águas profundas e possui uma alta magnitude de velocidade e espessura, simular uma corrente de turbidez, em condições controladas, permite a observação da resposta à alteração de uma única variável que seria difícil de observar na natureza. Contudo, a utilização de modelos físicos pode gerar uma preocupação concernente à representatividade do fenômeno no ambiente natural.

Dentre os parâmetros adimensionais que descrevem uma corrente de turbidez, o uso de um sedimento com menor densidade que a do sedimento transportado pela corrente na natureza, garante a similaridade entre o protótipo e o modelo da relação entre a velocidade de queda do sedimento (w) e a velocidade média da corrente (v) (fórmula 2) (MIDDETLON, 1966a, 1966b). Esses parâmetros de escala são utilizados porque melhor caracterizam o grau/intensidade/força com que as partículas são suspensas dentro da corrente que a transporta. Contudo, poucos questionam o efeito da utilização de um sedimento com menor densidade (e outras características físicas), a partir de sua influência na reologia do fluxo.

Mesmo que as propriedades físicas do caulim desempenhem um papel predominante na reologia de uma mistura com partículas não coloidais, a intensidade da interação com essas partículas pode variar conforme as características físicas das mesmas. Isso é demonstrado no gráfico da figura 45, onde a linha que divide a transição de comportamento reológico é diferente para as três misturas compostas de material coesivo e não coesivo. A linha pontilhada em vermelho sinaliza a transição entre o comportamento Newtoniano e não Newtoniano das misturas utilizadas neste trabalho, em linha pontilhada de cor azul, a transição de comportamento reológico de misturas compostas de caulim e areia (COUSSOT e PIAU, 1994; KIRYU, 2006; SANTOS, 2003) e, em linha contínua de cor preta, a transição de comportamento reológico encontrada por Manica (2009) que trabalhou com caulim e esfera de vidro.

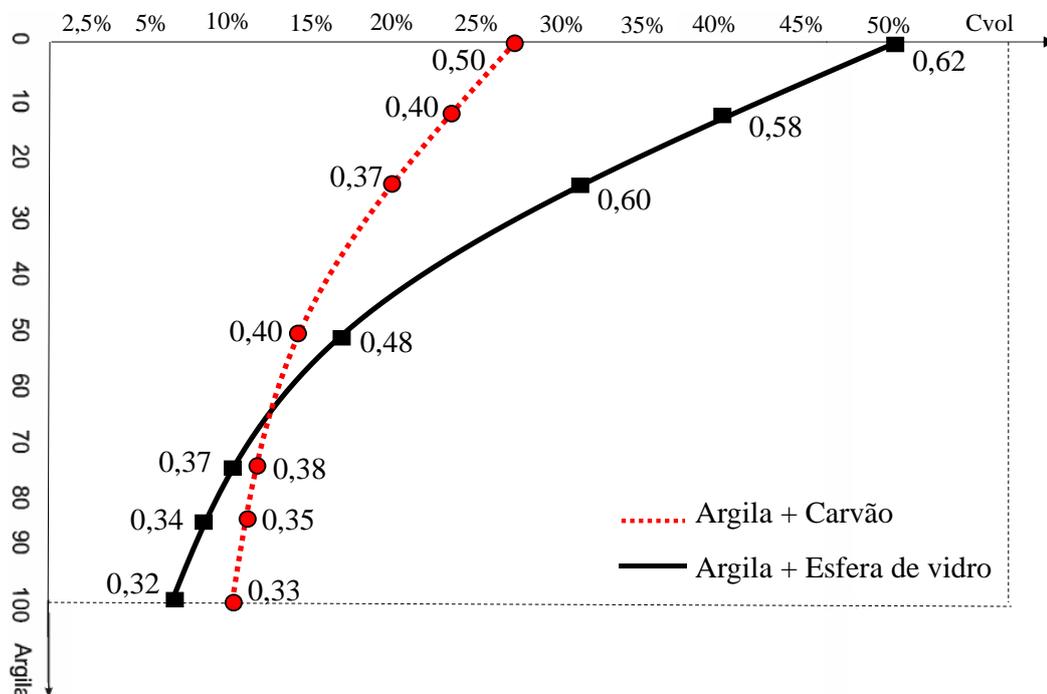
Figura 45 – Representação da transição de comportamento reológico encontrada neste trabalho (linha pontilhada vermelha) e nos trabalhos de Coussot e Piau (1994), Santos (2003) e Kiryu (2006) (linha tracejada em azul) e no trabalho de Manica (2009) (linha contínua)



Como pode ser observado no gráfico da figura 45, a transição de comportamento reológico para as misturas com 100% de caulim ocorreu para diferentes concentrações volumétricas de sedimento. Essa não convergência das curvas pode ser explicada pelo fato de cada autor ter utilizado um caulim proveniente de fontes diferentes, bem pelos diferentes critérios para a escolha do *spindle* e da metodologia de operação do reômetro. Uma vez que o coeficiente de viscosidade não possui um valor absoluto, sendo muito sensível ao procedimento experimental e à escolha do equipamento de medição. Na parte superior do gráfico, observa-se que a transição de comportamento ocorre primeiramente para as misturas com maior quantidade de carvão, seguido das misturas com areia e por último as misturas com maior quantidade de esfera de vidro. Esse distanciamento entre as curvas surge à medida que diminui a quantidade de caulim na mistura e, conseqüentemente, ocorre o distanciamento do valor da máxima fração de empacotamento (figura 46). Com menos de 50% de caulim presente nas misturas, as propriedades físicas do material inerte, como distribuição granulométrica e forma da partícula, justificam o aumento dos valores de máxima fração de empacotamento e o distanciamento entre as curvas. Uma vez que a distribuição

granulométrica do carvão é mal selecionada (de 0,07 a 400 μm), ou seja, apresenta uma quantidade maior de diferentes tamanhos de grãos em comparação à da esfera de vidro (de 10 a 90 μm) (MANICA,2009), as partículas menores podem se posicionar entre as maiores. Por outro lado, uma distribuição granulométrica bem selecionada (tamanhos similares de grãos) permite que os espaços sejam ocupados pelo fluido intersticial (água + caulim) o que facilitaria o escoamento, fazendo com que a transição de comportamento reológico aconteça com uma concentração volumétrica maior em comparação às misturas com carvão. Quanto à forma das partículas, o carvão apresenta uma forma semiangular e semiarredondada (MANICA, 2002) em contrapartida à forma arredondada da esfera de vidro (MANICA, 2009), e, portanto, a ocupação dos espaços vazios é maior e, conseqüentemente, as misturas com carvão apresentam menores valores de máxima fração de empacotamento e sua transição de comportamento reológico ocorre para uma concentração volumétrica menor.

Figura 46 – Representação da transição de comportamento reológico encontrada neste trabalho (linha pontilhada vermelha) e no trabalho de Manica (2009) (linha contínua) e valores de máxima fração de empacotamento das misturas compostas com diversas proporções de argila + carvão e argila + esfera de vidro



Brito (2005) afirma que “para que se garanta a eliminação do efeito de escala, devem ser mantidas constantes: a massa específica do sedimento empregado na mistura, as condições de admissão da mesma e também o valor do número de Froude Densimétrico”. Apesar da afirmação do autor, a literatura científica (MOTTA, 1972; BARENBLATT, G. I. 2003) é

categórica em afirmar que um modelo em escala reduzida não replica perfeitamente o comportamento do fenômeno físico estudado, ou seja, os efeitos de escala não podem ser eliminados, mas sim minimizados. Com o uso de sedimento com menor densidade nos experimentos, a manutenção da igualdade da massa específica da mistura ensaiada em relação a mistura da natureza ocorre com o aumento da concentração volumétrica de sedimentos, ou seja, acarreta em uma quantidade maior de partículas injetadas na mistura e, conseqüentemente, a uma possível mudança de comportamento reológico, que tem implicações diretas nos mecanismos de transporte e deposição de sedimentos. Considerando utilizar carvão ($\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$) para simular uma corrente composta por areia com massa específica de 2650 kg/m^3 , para se garantir a igualdade da massa específica das misturas em 1076 kg/m^3 obtida com o uso da fórmula 41, a concentração volumétrica do carvão precisar ser 8,7 vezes a concentração volumétrica de areia. Como pode ser visualizado na figura 47, em que está representado a transição de comportamento reológico encontrada neste trabalho (linha pontilhada vermelha), nos trabalhos de Coussot e Piau (1994), Santos (2003) e Kiryu (2006) (linha pontilhada em azul) com caulim e areia, uma mistura com concentração volumétrica de 40% de carvão apresenta um comportamento não Newtoniano, contudo, uma mistura de areia teria uma concentração volumétrica de sedimentos de 4,6% e um comportamento Newtoniano.

$$\rho_m = \rho_a + (\rho_s - \rho_a) \cdot \phi \quad (\text{fórmula 41})$$

Onde:

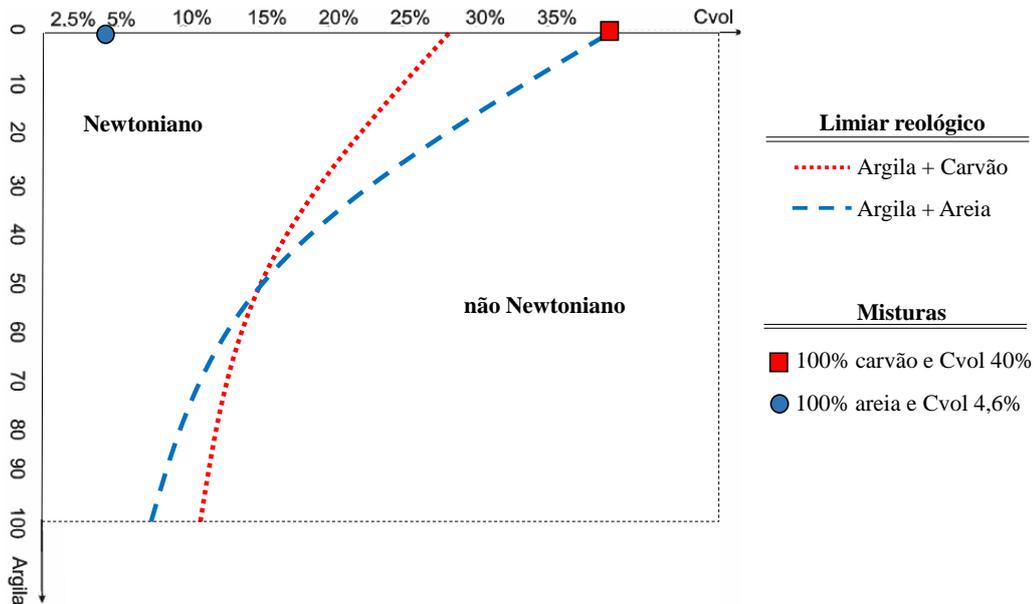
ρ_m = massa específica da mistura (kg/m^3);

ρ_a = massa específica da água (kg/m^3);

ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m^3);

ϕ = concentração volumétrica de sedimentos (%).

Figura 47 – Representação da transição de comportamento reológico encontrada neste trabalho (linha pontilhada vermelha) e nos trabalhos de Coussot e Piau (1994), Santos (2003) e Kiryu (2006) (linha tracejada em azul); identificação do comportamento reológico de uma mistura com 100% carvão e Cvol 40% e 100% areia e Cvol 4,6%



Como foi demonstrado, nem sempre haverá semelhança de comportamento mecânico, ou seja, de comportamento reológico, entre as misturas usadas na simulação das correntes de turbidez em laboratório e as do ambiente natural. Uma vez que o objetivo maior em simular em escala reduzida correntes de turbidez tem implicações na interpretação do depósito gerado e, por fim, no desafio de prever a qualidade e extensão dos reservatórios, a elaboração de uma escala com semelhança reológica deveria ser considerada, para que se buscasse uma igualdade nos valores de viscosidades das misturas ensaiadas com as do ambiente natural, uma vez que as características físicas do material como massa específica e máxima fração de empacotamento e a proporção dos elementos que compõem a corrente e a sua concentração volumétrica afetam sensivelmente a dinâmica do escoamento e seu comportamento reológico. Além do que, deve ser mantido em mente que modificações reológicas podem ocorrer durante o percurso do fluxo e desempenhar um papel importante no escoamento. O poder das experiências nesse contexto não surge de seu status como análogos em miniatura, que nunca podem ser garantidos totalmente, mas sim da sua capacidade de capturar, em condições controladas, elementos importantes da complexidade natural do fenômeno que podem auxiliar na interpretação dos depósitos naturais.

8 CONCLUSÕES

Foi analisado o comportamento reológico de misturas contendo caulim e/ou carvão em diferentes proporções e concentração de sedimentos. O comportamento mecânico dessas misturas, ou seja, a relação entre a tensão aplicada e a taxa de deformação sofrida pelas mesmas, foi satisfatoriamente ajustado aos modelos de Newton e Herschel-Bulkley. Percebe-se que a concentração de sólidos é uma variável que possui uma influência direta na mudança de comportamento reológico e foi quem determinou a transição entre o modelo Newtoniano e o modelo de Herschel-Bulkley. A proporção de caulim na mistura também é um fator importante, pois é o material ativo, aquele que pode absorver as moléculas de água, levando a misturas com uma mesma concentração volumétrica, mas proporções diferentes de caulim e carvão, a apresentarem fluidez diferente.

Conforme demonstrado no gráfico da figura 45, a transição de comportamento reológico (Newtoniano para não Newtoniano) das misturas compostas de material coesivo (caulim) e não coesivo (carvão, areia ou esfera de vidro) ocorre para diferentes concentrações volumétricas de sedimento e proporção de caulim na mistura. Como nem sempre haverá semelhança de comportamento reológico entre as misturas usadas na simulação das correntes de turbidez em laboratório e as do ambiente natural, deve ser mantido em mente que os resultados apresentados neste trabalho podem não ser diretamente transferíveis para os fluxos na natureza, mas servem como um delineamento do seu possível comportamento.

8.1 QUANTO AOS OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

- *estabelecer uma metodologia de ensaio para o reômetro C-VO da marca Bolhin adaptada às misturas utilizadas em simulação física de correntes de turbidez;*

Uma atenção maior deve ser dada ao se trabalhar com misturas particuladas (carvão), cujas partículas tendem a sedimentar com baixos valores de cisalhamento e a migrar para parte externa da parede do cilindro (centrifugação) com velocidades mais altas. Os resultados experimentais requerem uma análise cuidadosa, da mesma forma que fica clara a necessidade da realização de repetições dos ensaios durante a reometria de cisalhamento. Quanto à metodologia de operação do reômetro, baseando-se nos altos valores dos coeficientes de determinação (R^2), pode-se afirmar que a escolha dos diferentes *spindles* e as tensões mínimas

aplicadas para que não ocorressem efeitos indesejados, tornou possível o estabelecimento de uma amostra homogênea que possibilitasse gerar resultados confiáveis.

- *formular uma equação reológica que correlacione a viscosidade em função da concentração volumétrica de cada sedimento presente na mistura e a proporção de argila, aplicável aos materiais comumente utilizados nas simulações físicas de correntes de turbidez.*

A influência da massa específica, da porcentagem de argila (%A), da concentração volumétrica (ϕ) e da máxima fração de empacotamento (ϕ_{\max}) foram consideradas na formulação das equações. Assim, a equação para estimar a viscosidade relativa para suspensões com comportamento Newtoniano e diferentes concentrações de caulim (ϕ_A) e carvão (ϕ_C) é definida conforme a fórmula 27.

$$\mu_r = 1 + 31,53.\phi.\phi_A + 9,43.\phi.\phi_C \quad (\text{fórmula 35})$$

Onde:

$$\phi_A = 0,892.(\%A)^{1,348} \quad (\text{fórmula 33})$$

$$\phi_C = 1,042.(\%C)^{0,674} \quad (\text{fórmula 34})$$

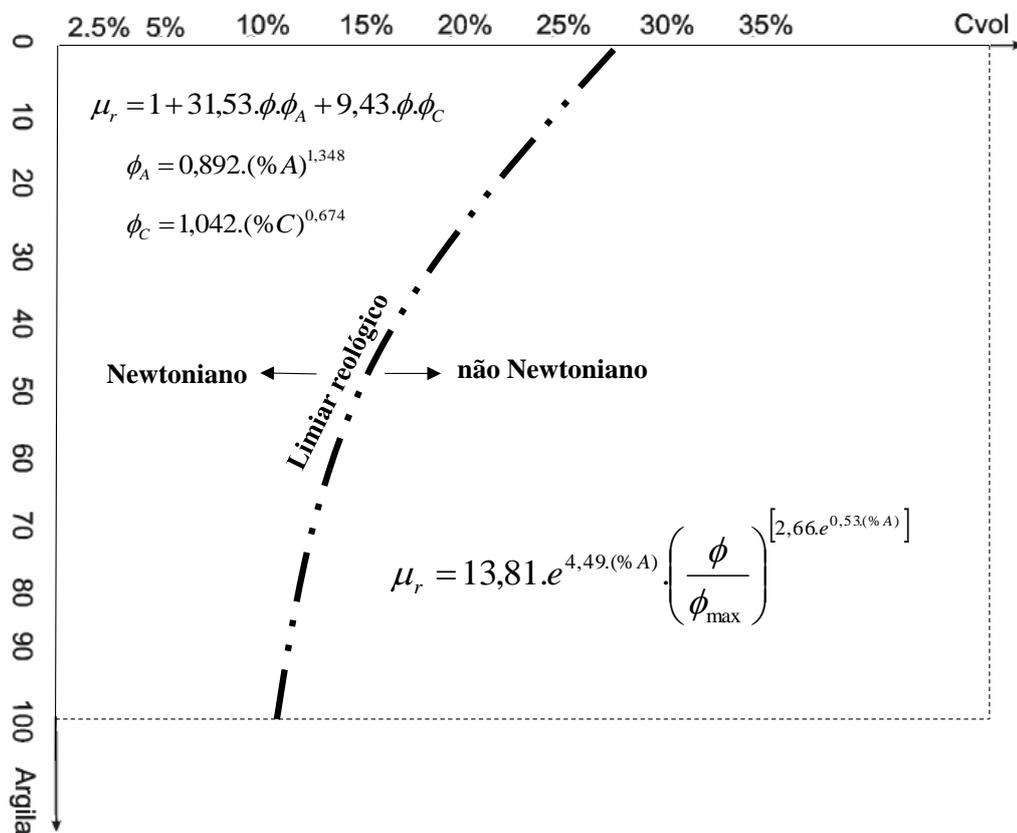
A equação para estimar a viscosidade relativa para suspensões com comportamento não Newtoniano é definida conforme a fórmula 32.

$$\mu_r = 13,81.e^{4,49.(\%A)} \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_{\max}} \right)^{\left[2,66.e^{0,53(\%A)} \right]} \quad (\text{fórmula 40})$$

Uma comparação entre os valores da viscosidade relativa prevista pelas fórmulas propostas e os valores obtidos experimentalmente demonstrou uma baixa ocorrência do erro relativo percentual maior do que $\pm 15\%$. Esse resultado demonstra que as fórmulas propostas neste trabalho estimaram satisfatoriamente a viscosidade relativa das misturas ensaiadas. Contudo, uma análise comparativa dos dados demonstrou que as equações propostas neste trabalho não puderam prever satisfatoriamente a viscosidade relativa para todas as misturas de caulim e/ou esfera de vidro de Manica (2009).

A exclusividade do uso dessas equações deve-se ao fato da viscosidade ser uma propriedade intrínseca do material, dependente da microestrutura e parâmetros físicos de uma mistura, portanto, o uso das mesmas é limitado às misturas com partículas de caulim e/ou carvão utilizadas no Neced dentro do limite das concentrações volumétricas e proporção de sedimento conforme indicadas no gráfico abaixo (figura 40).

Figura 40 – Equações propostas neste trabalho para determinar a viscosidade relativa de misturas compostas de caulim e carvão



8.2 QUANTO AO OBJETIVO PRINCIPAL

Para as misturas utilizadas em simulação física de correntes de turbidez, comparar os dados de viscosidade obtidos via ensaio reológico com as estimativas feitas através do uso de modelos (equações) reológicos.

Para as misturas com mais de 75% de carvão, os modelos Chong et al. (1971) e Maron e Pierce (1956) podem ser vistos como uma boa ferramenta para se obter uma estimativa da viscosidade relativa. Os demais modelos utilizados não puderam prever com sucesso a viscosidade relativa das misturas usadas neste estudo. Como o valor da viscosidade intrínseca não pode ser estimado e visto que as equações são sensíveis e esse parâmetro, é importante levar em consideração que os resultados podem apresentar diferenças. Um aspecto comum ao modelo de Chong et al. (1971) e Horri et al. (2010) é a presença de uma constante (k) que pode ser estimada pela aplicação de um procedimento de melhor ajuste para os dados de cada mistura. Apesar do modelo proposto por Horri et al. (2010) ter sido concebido para suspensões cerâmicas, ele não representou satisfatoriamente as misturas com 100% de caulim, mas forneceu bom ajuste para concentração volumétrica maior que 20%, no caso da mistura de 50% de caulim e 50% de esfera de vidro de Manica (2009). Pode-se argumentar, portanto, que muitas vezes não é plausível generalizar estas formulações, pois elas não contabilizam outros efeitos significativos que ocorrem em uma suspensão.

9 RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista os resultados alcançados neste trabalho, sugere-se como complementação e aprimoramento deste estudo:

1. Realizar ensaios para baixas concentrações ($C_v < 5\%$), a fim de determinar o valor da viscosidade intrínseca das misturas ensaiadas;
2. A definição dos adimensionais que estabelecem uma relação de semelhança reológica entre os valores de viscosidade das misturas utilizadas na simulação física com as do ambiente natural.

REFERÊNCIAS

- ÁVILA, D. M. **Modelagem física de correntes de densidade no estudo de depósitos turbidíticos**. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Marinha) - Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ALTINAKAR, M. S.; GRAF, W. H.; HOPFINGER, E. J. Flow structure in turbidity currents. **Journal of Hydraulic Research**, v. 34, p. 713-718, 1996.
- ARRIGHI, C. Relatório de estágio. 2014. Núcleo de Estudos de Corrente de Densidade – NECOD/IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BARENBLATT, G. I. **Scaling**. Cambridge University Press, 2003.
- BARNES, H. A.; HULTON, J. F.; K. WALTERS, F. R. S. **An Introduction to Rheology**. 3 ed. Elsevier, 1993.
- BARNES, H. A. Rotation vane rheometry – a review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 98, p. 1-14, 2001.
- BATCHELOR, G. K.; GREEN, J. T. The determination of the bulk stress in a suspension of spherical particles to order c^2 . **Journal of Fluid Mechanic**, v. 56, p. 375-400, 1972.
- BENDAT, J. S.; PIERSON, A. G. **Randon Data. Analysis and Measurement Procedures**. 4 ed. Wiley, 2010.
- BERUTO, D. T.; LAGAZZO, A.; BOTTER, R.; GRILLO, R. Yield stress measurements and microstructure of colloidal kaolin powders clusterized and dispersed in different liquids. **Particuology**, v. 7, p. 438-444, 2009.
- BINGHAM, E. C. **Fluidity and plasticity**. 1 ed. MacGraw-Hill, 1922.
- BOFFO, C. H. **Caracterização física de correntes de densidade em ambientes salinos sob diferentes contrastes de densidades**. 2010. 141 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BOURNONVILLE, B.; NZIHOU, A. Rheology of non-Newtonian suspensions of fly ash: effect of concentration, yield stress and hydrodynamic interactions. **Powder Technology**, v. 128, p. 148-158, 2002.
- BRITO, D. U. **Efeito das escalas de simulação sobre os padrões deposicionais de fluxos turbidíticos**. 2005. 99 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BRODNYAN, J. G. The Concentration Dependence of the Newtonian Viscosity of Prolate Ellipsoids. **Journal of Rheology**, v. 3, n. 1, p. 61-68, 1959.
- BROWERS, H. J. H. Viscosity of a concentrated suspension of rigid monosized particles. **Physical Review E**, 81, p. 051402-1 – 051402-11, 2010.

CASSON, N. **Rheology of Dispersed Systems**, ed. C. C. Mills. Pergamon Press, Elmsford, NY, 84, 1959.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-newtonian flow and applied rheology**. 2 ed. Elsevier, 2008.

CHONG, J. S.; CHISTIANSEN, E. B.; BAER, A. D. Rheology of concentrated suspensions. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 15, p. 2007-2021, 1971.

COUSSOT, P.; PIAU, J. K. On the behavior of fine mud suspensions. **Rheologica Acta**, v. 73, p. 175-184, 1994.

COUSSOT, P. **Mudflow rheology and dynamics**. 1 ed. Rotterdam: Taylor & Francis, 1997.

_____. **Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials: applications in industry and environment**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

DABAK, T.; YUCEL, O. Shear viscosity behavior of highly concentrated suspensions at low and high shear-rates. **Rheologica Acta**, v. 25, p. 527-533, 1986.

DE WAALE, A. Oil and Color Chem. **Assoc. J.**, 6, p. 33-38, 1923.

DEL REY, A. C. **Simulação física de processos gravitacionais subaquosos: uma aproximação para o entendimento da sedimentação marinha profunda**. 2006. 255 f. Tese (Doutor em Geociências) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DESHPANDE, A. P.; KRISHANAN, J. M.; KUMAR, P. B. S. **Rheology of Complex Fluids**. Springer, 2010.

DOTT Jr, R. H. Dynamics of subaqueous gravity depositional process. **American Association of Petroleum Geologist Bulletin**, v. 47, p. 104-128, 1963

DOUGHERTY, T. J.; KRIEGER, I. M. Potential around a charged colloidal sphere. **Journal of Physical Chemistry**, v. 63, n. 11, p. 1869-1872, 1959.

DUCKER, R.E. **Avaliação da capacidade portante de frações dinas nas correntes de turbidez**. 2007. 87 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

EINSTEIN, A. Berichtigung zu meiner Arbeit: Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. **Annalen der Physik**, v. 34: p. 591-592, 1911.

FABIAN, S. **Modelagem física de correntes de densidade conservativas em canal de declividade variável**. 2002. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

FICK, C. **Modelagem tridimensional de correntes de turbidez: caracterização espacial de depósitos análogos sob a ação de controles autogênicos**. 2015. 33 f. Dissertação (Mestre em

Geociências) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FOX, W. F.; MACDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GUIRRO, A. C. **Simulações físicas com corrente de turbidez num tanque sem confinamento lateral: efeitos da variação do tamanho dos grãos e da vazão**. 2008. 229 f. Tese (Doutor em Geociências) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HERSCHEL, W. H.; BULKLEY, R. Über die viskosität und Elastizität Von Solen. American Society of Testing Material, v. 26, p. 621-633, 1926.

HORRI, B. A.; RANGANATHAN, P.; SELOMULYA, C.; WANG, H. A new empirical viscosity model for ceramic suspensions. **Chemical Engineering Science**, v. 66, p. 2798-2806, 2011.

KIRYU, H. S. **Investigação reológica e análise mecânica de compósitos não-Newtonianos**. 2006. 191f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Ênfase em Ciências Térmicas) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

KNELLER, B.; BUCKEE, C. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. **Sedimentology**, v. 47, p. 62-94, 2000.

LIU, DM. Particle packing and rheological property of highly-concentrated ceramic suspension: ϕ_m determination and viscosity prediction. **Journal of Materials Science**, v. 35, n. 21, p. 5503 – 5507, 2000.

MANICA, R. **Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada**. 2002. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

_____. **Geração de correntes de turbidez de alta densidade: condicionantes hidráulicos e deposicionais**. 2009. 426 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARON, S. H., PIERCE, P. E. Application of Ree-Eyring generalized flow theory to suspensions of spherical particles. **Journal of Colloid Science**, v. 11, p. 80 – 95, 1956.

MIDDLETON, G. V. Small-scale models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 36, p. 202-208, 1966a.

_____. Experiments on density and turbidity currents; Part 1: uniform flow of density currents. **Canadian Journal Earth Sciences**, v. 3, p. 523-546, 1966b.

MOTTA, V. F. **Curso de Teoria da Semelhança**. Porto Alegre, Ed. URGS. 1972.

NZIHOU, A.; ATTIAS, L.; SHARROCK, P.; RICARD, A. A rheological, thermal and mechanical study of bone cement from a suspension to a solid biomaterial. **Powder Technology**, n. 99, p. 60-69, 1998.

OSTWALD, W. **Ueber die Geschwindigkeitsfunktion der Viscositatet disperser Systeme. Kolloid-Z**, v. 36, p. 99-128, 1925.

PABST, W. Fundamental consideration on suspension rheology. **Journal Ceramics-Silikáty**, v. 48, n. 1, p. 6-13, 2004.

PUHL, E. **Parametrização de ensaios de simulação física de correntes de densidade**. 2007. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

_____. **Morfodinâmica e condição de equilíbrio do leito sob ação de correntes de turbidez**. 2012. 178 f. Tese (Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RUTGERS, I. R. Relative Viscosity of Suspensions of Rigid Spheres in Newtonian Liquids. **Rheologica Acta**, n. 2, p. 202-210, 1962.

_____. Relative Viscosity and Concentration. **Rheologica Acta**, n. 2, 305-348, 1962.

SANTAMARIA-HOLEK, I., MENDOZA, C. I. The rheology of concentrated suspensions of arbitrarily-shape particles. **Journal of Colloidal and Interface Science**, v. 346, p. 118 – 126, 2010.

SANTOS, F. L. **Estudo teórico-experimental em via de determinação de lei de atrito em escoamentos de fluidos hiperconcentrados**. 2003. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Ênfase em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

SHEWAN, H. M., STOKES, J. R. Analytically predicting the viscosity of hard spheres suspensions from the particle size distribution. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 222, p. 72-81, 2015.

TROPEAL, C.; YARIN, A. L.; FOSS, J. F. **Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics**, 2007.

TURIAN, R. M; ATTAL, J. F.; SUNG, D. J.; WEDGEWOOD, L. E. Properties and rheology of coal – water mixtures using different coals. **Fuel**, n. 81, p. 2019-2033, 2002.

ZHOU, J. Z. Q.; FANG, T.; LUO, G.; UHLHERR, P. H. T. Yield stress and maximum packing fraction of concentrated suspensions. **Rheologica Acta**. Steinkopff Verlag, v. 34, n. 6, p. 544-561, 1995.

WILDEMUTH, C. R.; WILLIAMS, M. C. Viscosity of suspensions modeled with a shear-dependent maximum packing fraction. **Rheol Acta**, v. 32, p. 627-635, 1984