UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Camila Castro

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE UMA MISTURA DE ÁGUA E SEDIMENTO

Porto Alegre
dezembro 2011

CAMILA CASTRO

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE UMA MISTURA DE ÁGUA E SEDIMENTO

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ana Luiza de Oliveira Borges
Coorientador: Rafael Manica

Porto Alegre

dezembro 2011

CAMILA CASTRO

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE UMA MISTURA DE ÁGUA E SEDIMENTO

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande

Porto Alegre, 9 de dezembro de 2011

Profa. Ana Luiza de Oliveira Borges
Dra. pela Université de Grenoble I
(Scientifique Et Medicale - Joseph Fourier), França
Orientadora

Prof. Rafael Manica
Dr. pela Universidade
Federal do Rio Grande do Sul
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rafael Manica
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental pela UFRGS

Profa. Edith Beatriz Camano Schettini
Dra.em Engenharia Mecânica pelo Institut
National Polytechnique de Grenoble

Profa. Ana Luiza de Oliveira Borges
Dra. pela Université de Grenoble I -
Scientifique Et Medicale - Joseph Fourier

Prof. Rogério Dornelles Maestri
Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental pela UFRGS e Mestre em
Mecânica pelo Institut National
Polytechinique de Grenoble

Dedico este trabalho a meus pais, Elias e Marines, e a minha irmã Cândida, minha maior incentivadora.

AGRADECIMENTOS

Sou grata aos meus professores orientadores, Ana e Manica, por me guiarem pelo profundo, complexo e desconhecido (para mim) universo da reologia. Obrigada por me proporcionarem um feliz aprendizado com a pesquisa.

Ao professor Maestri pelo apoio, ensino e confiança oferecidos.

Agradeço aos pesquisadores e colegas do Necod, Daniel, Leonardo, Pedro, Richard, Caroline, Farina e Cristiano, pelo aprendizado diário, pelos esclarecimentos e pela convivência. Às secretárias Thaís e Eva e aos hidrotécnicos Fabrício, Nicolas e Cristian, pelo suporte.

Agradeço aos meus pais por tanto carinho oferecido a mim, abraços, afagos, e incentivos.

Agradeço às amigas Cândida, Julia e Clarissa por disponibilizarem seus ouvidos e sua atenção às minhas histórias, que acredito, as divertiam, pois nos últimos tempos sempre sorriam e perguntavam, como alguém que tem intimidade, como passava o reômetro. Obrigada por se alegrarem comigo e me aceitarem na suas vidas.

Obrigada, Eduardo Puhl – Slow – pelo seu amor por Deus. Durante a realização dessa pesquisa, mesmo sendo tão importante e intrigante como as coisas profundas da natureza devem ser, sua alegria em amar/servir as pessoas era um recado constante de onde eu deveria depositar mais a minha atenção.

À empresa PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. que através do seu financiamento permitiu o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ao meu amigo Jesus, pois nos momentos que minha alma desanimava você sempre sabia (e me revelava) o caminho que eu devia seguir.

Coisas profundas são intrigantes. Selvas profundas. Águas profundas. Cavernas profundas, desfiladeiros profundos. Pensamentos profundos e conversas profundas.

Charles R. Swindoll

RESUMO

Na natureza, correntes de turbidez são fluxos gerados pela diferença de densidade entre fluidos ocasionada pela presença de sedimentos em suspensão. Esse tipo de escoamento caracteriza uma das principais formas de transporte e deposição de material em meio sub-aquoso, como lagos e mar, onde tais depósitos podem constituir-se em reservatórios de hidrocarbonetos. No Necod/IPH/UFRGS esses fluxos, são simulados em laboratório, sob condições controladas, buscando-se entender o seu comportamento hidrodinâmico e deposicional. Além disso, para um entendimento completo do fenômeno natural, é importante estabelecer as características reológicas das misturas presentes no fluxo e seu comportamento mecânico quando submetidos a diferentes relações de tensão/taxa de deformação. Assim, o presente trabalho investigou o comportamento reológico dessas misturas de água e sedimentos utilizadas em experimentos físicos de correntes de densidade. 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). Para tanto, estabeleceu-se amostras homogêneas e ajustou-se um modelo reológico, cuja equação constitutiva refletisse o comportamento em termos da relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento. Os ensaios foram realizados com uma mistura de água, argila (caulim) e carvão mineral, em diversas proporções, nas concentrações volumétricas de 5%, 7% e 15%. Foram realizados testes preliminares para o ajuste da metodologia de uso do reômetro, nos quais foram determinados a faixa de variação da tensão a ser aplicada (0 a 3 Pa e 0 a 2,5 Pa), o tempo (22 min para as suspensões e 37 mim para a água), o tipo de ensaio (variando a tensão de cisalhamento) e o *spindle* a ser utilizado (prato paralelo). Para as concentrações de 5% e 7%, as misturas ensaiadas apresentaram um comportamento Newtoniano, e, para a concentração de 15%, foi observado um comportamento não Newtoniano, sendo o modelo de Hershel-Bulkley o que melhor se ajustou aos resultados.

Palavras-chave: Fluido Não Newtoniano. Reologia. Corrente de Turbidez.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama do delineamento da pesquisa..... 16

Figura 2 – Forças de campo e de superfície..... 19

Figura 3 – *Spindle* cone e prato..... 21

Figura 4 – *Spindle* cilindros concêntricos..... 23

Figura 5 – Efeito da sedimentação e migração..... 23

Figura 6 – *Spindle* pratos paralelos..... 24

Figura 7 – Deslocamento de um fluido entre placas..... 26

Figura 8 – Reograma para um fluido Newtoniano..... 27

Figura 9 – Curva de viscosidade x taxa de cisalhamento para um fluido Newtoniano..... 27

Figura 10 – (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do plástico de Bingham..... 29

Figura 11 – (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do modelo Lei de Potência..... 30

Figura 12 – (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do modelo Herschel-Bulkley..... 31

Figura 13 – foto de uma corrente de turbidez simulada em laboratório..... 33

Figura 14 – Reograma com diversas concentrações em volume Cv para T = 20°C..... 35

Figura 15 – Distribuição granulométrica..... 38

Figura 16 – Reômetro..... 40

Figura 17 – *Spindle*..... 40

Figura 18 – Tela de resultados do teste..... 41

Figura 19 – Mudança do regime de escoamento em um reograma..... 42

Figura 20 – Tendência de comportamento (a) Cv 5% de 100%_caulim; (b) Cv 15% de 100%_caulim..... 45

Figura 21 – Curva de viscosidade para Cv 15% de 100%_caulim..... 46

Figura 22 – (a) mistura com maior quantidade de caulim; (b) mistura com maior quantidade de carvão..... 47

Figura 23 – Reograma das Cv de 5% e 7% das amostras com 100%_caulim..... 48

Figura 24– Comparação da relação entre a viscosidade relativa e taxa de deformação com os dados de Manica (2009) para amostras com 100%_caulim de Cv 5, 7, 10 e 15%..... 48

Figura 25 – Detalhamento da figura 25: comparação da relação entre a viscosidade relativa e taxa de deformação com os dados de Manica (2009) para amostras com 100%_caulim e Cv de 5, 7 e 10%..... 50

Figura 26 – Comparação dos resultados de caracterização reológica com as medidas de Coussot (1995) para a argila St-Bernard..... 51

Figura 27 – Comparação da relação entre a viscosidade relativa e taxa de deformação com os dados de Manica (2009) (amostras com 50%_caulim_50%_esfera de vidro) e deste trabalho (amostras com 50%_caulim_50%_carvão)..... 52

Figura 28 – Comparação da relação entre a viscosidade relativa e taxa de deformação com os dados de Manica (2009) (amostras com 0%_caulim_100%_esferas de vidro) e deste trabalho (amostras com 0%_caulim_100%_carvão)..... 53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição da mistura e concentração volumétrica usadas nos ensaios..... 15

Tabela 2 – Comportamento reológico de misturas de argila e esfera de vidro para diversas concentrações..... 34

Tabela 3 – Comportamento reológico de misturas de argila e areia para diversas concentrações 35

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos do ajuste dos modelos reológicos..... 44

Tabela 5 – Viscosidade relativa para Cv 5% e 7%..... 46

Tabela 6 – Comparação das diferentes composições de sedimento das misturas, faixa granulométrica, e método de medição com os dados de Coussot (1995)..... 51

Tabela 7 – Comparação dos diferentes tipos de materiais das misturas, tamanho médio dos grãos, massa específica e forma dos grãos com os dados de Manica (2009) 52

Tabela 8 – Valores da viscosidade dinâmica e analítica para Cv 5% da mistura de 100%_caulim_0%_carvão..... 54

Tabela 9 – Valores da viscosidade dinâmica e analítica para Cv 7% da mistura de 100%_caulim e 100%_carvão..... 54

LISTA DE SÍMBOLOS

F – força (N)

μ – coeficiente de viscosidade dinâmica (N.s/m)

du/dy – gradiente de velocidade, taxa de cisalhamento ou taxa de deformação (s^{-1})

τ – tensão de cisalhamento (Pa)

μ_a – viscosidade aparente (Pa.s)

μ_p – viscosidade plástica (Pa.s)

τ_L – tensão de cisalhamento crítica (Pa.s)

k – índice de consistência ($Pa.s^n$)

n – índice de comportamento ou de fluxo

D – diâmetro

H – distância entre os pratos

θ – ângulo

Cv – concentração volumétrica (%)

ϕ – concentração volumétrica (%).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
2 DIRETRIZES DA PESQUISA 13
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA 13
2.2 OBJETIVO DO TRABALHO 13
2.2.1 Objetivo Principal 13
2.2.2 Objetivo Secundário 13
2.3 HIPÓTESE 13
2.4 PRESSUPOSTOS 14
2.5 DELIMITAÇÕES 14
2.6 LIMITAÇÕES 14
2.7 DELINEAMENTO 14
3 INTRODUÇÃO À REOMETRIA E A REOLOGIA..... 17
3.1 FLUIDOS E VISCOSIDADE..... 17
3.2 EQUAÇÃO CONSTITUTIVA..... 18
3.3 REOMETRIA..... 21
3.4 CONCEITOS BÁSICOS DE REOLOGIA..... 25
3.4.1 Classificação Reológica dos Fluidos..... 28
3.4.2 Reologia de Suspensão..... 32
4 MATERIAIS, EQUIPAMENTO E MÉTODO..... 37
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS..... 37
4.2 EQUIPAMENTO..... 39
4.3 METODOLOGIA..... 40
5 RESULTADOS 42
5.1 RESULTADOS PRELIMINARES 42
5.2 AJUSTE DO MODELO REOLÓGICO..... 43
5.3 RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE VISCOSIDADE RELATIVA E A TAXA DE DEFORMAÇÃO..... 50
5.4 CÁLCULO ANALÍTICO DA VISCOSIDADE..... 54
6 CONCLUSÕES..... 56
REFERÊNCIAS 62

1 INTRODUÇÃO

A Reologia dos Materiais abrange muitas áreas de pesquisa em que existe a necessidade de se compreender as propriedades de fluidez dos materiais. Quando uma mistura está sujeita a uma tensão, em virtude da forma, ligações e tamanhos diferenciados de seus grãos, ocorrerão mudanças nos padrões de seu escoamento. A reologia é a ciência que estuda a relação de tensão e deformação dos corpos físicos.

O comportamento reológico de uma mistura pode ser estudado e caracterizado por meio de uma equação constitutiva que reflete o seu comportamento mecânico em termos da tensão e da taxa de cisalhamento. Dessa forma, um fluido Newtoniano pode ter seu comportamento modificado pelo aumento da concentração de partículas sólidas, em virtude da variação da granulometria e da composição do material, assumindo então, propriedades não Newtonianas.

A reologia ajuda a compreender um fenômeno da natureza chamado correntes de densidade. Estas são geradas pela diferença de densidade entre os fluidos, a qual pode ser ocasionada por diferenças de temperatura, pela presença de sedimentos em suspensão ou, ainda, pela presença de sais dissolvidos. Esse tipo de escoamento caracteriza uma das principais formas de transporte e deposição de sedimento em meio subaquoso, como lagos e mares, onde tais depósitos podem vir a constituir reservatórios de hidrocarbonetos.

Para melhor entender o comportamento das correntes de turbidez, este trabalho realizou a caracterização de uma mistura de água e sedimento e verificou a qual modelo reológico seu comportamento melhor se ajusta. Assim, este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo o primeiro aquele que contém esta introdução. O segundo capítulo trata das diretrizes da pesquisa, esclarecendo a questão proposta, os objetivos, hipótese e como ocorreram as etapas do trabalho. O capítulo 3 contempla conceitos fundamentais sobre a reologia e a reometria, que buscam criar uma base para o desenvolvimento do trabalho. O capítulo 4 apresenta a procedência dos materiais utilizados para os ensaios e a suas características físicas, o equipamento utilizado para caracterização reológica e detalha a metodologia experimental empregada. O capítulo 5 apresenta uma análise dos resultados obtidos nos ensaios. E, o capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho e algumas sugestões de estudos para outras pesquisas.

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, delimitações e limitações que a pesquisa possui. Também está apresentado o delineamento, mostrando o procedimento a ser seguido durante o estudo.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: caracterizadas as misturas de água e sedimento estudadas, qual o modelo reológico mais adequado para representá-las?

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 o ajuste de um modelo reológico ao comportamento das misturas de água e sedimento submetidas a um regime de tensões e deformações.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário deste trabalho é o estabelecimento de uma amostra padrão da mistura estudada, ou seja, uma amostra homogênea, para a caracterização reológica.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese básica deste trabalho é que, em função da concentração volumétrica presente na mistura, esta comporta-se reologicamente segundo o modelo de Herschel-Bulkley.

2.4 PRESSUPOSTOS

Este trabalho assume que o fluxo, *a priori*, possui características ideais, de forma que para a realização dos ensaios definem-se os seguintes pressupostos:

a) fluxo permanece laminar;
b) fluxo estacionário;
c) amostra permanece homogênea;
d) não há deslizamento na parede;
e) sem elasticidade;
f) ausência de variações de natureza física ou química ao longo do ensaio.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho de pesquisa delimita-se à condução da análise reológica da amostra em um reômetro rotacional C-VO da marca Bolhin com o uso da geometria prato paralelo.

2.6 LIMITAÇÕES

A pesquisa limita-se ao uso de caulim branco e carvão mineral 205, do tipo Cardiff, na constituição da mistura, e a realização dos ensaios com temperatura constante.

2.7 DELINEAMENTO

O presente trabalho foi divido em seis etapas, apresentadas a seguir:

a) pesquisa bibliográfica;
b) caracterização dos sedimentos;
c) prática de laboratório;
d) obtenção dos reogramas;
e) análise e avaliação dos resultados;
f) conclusões.

A primeira etapa, denominada pesquisa bibliográfica, foi direcionada à descrição de conceitos básicos sobre o comportamento dos fluidos e o efeito da presença de materiais suspensos na mistura. Posteriormente, foi realizada a caracterização dos sedimentos (caulim e carvão) por

meio do granulômetro para classificar as partículas das amostras pelos respectivos tamanhos e a medir as proporções correspondentes a cada tamanho gerando-se as curvas de distribuição granulométrica.

Para a realização dos ensaios, uma série de testes foram necessárias para ajustar a metodologia de uso do reômetro, pela qual se determinou a faixa de variação das tensões ou taxas de deformação a serem aplicadas, o tempo de ensaio, o tipo de ensaio e a escolha dos modelos de *Spindle* que foram utilizados (cone e prato, cilindro-coaxial ou prato paralelo). Na tabela 1, encontram-se os valores de concentração volumétrica e a composição dos materiais utilizados.

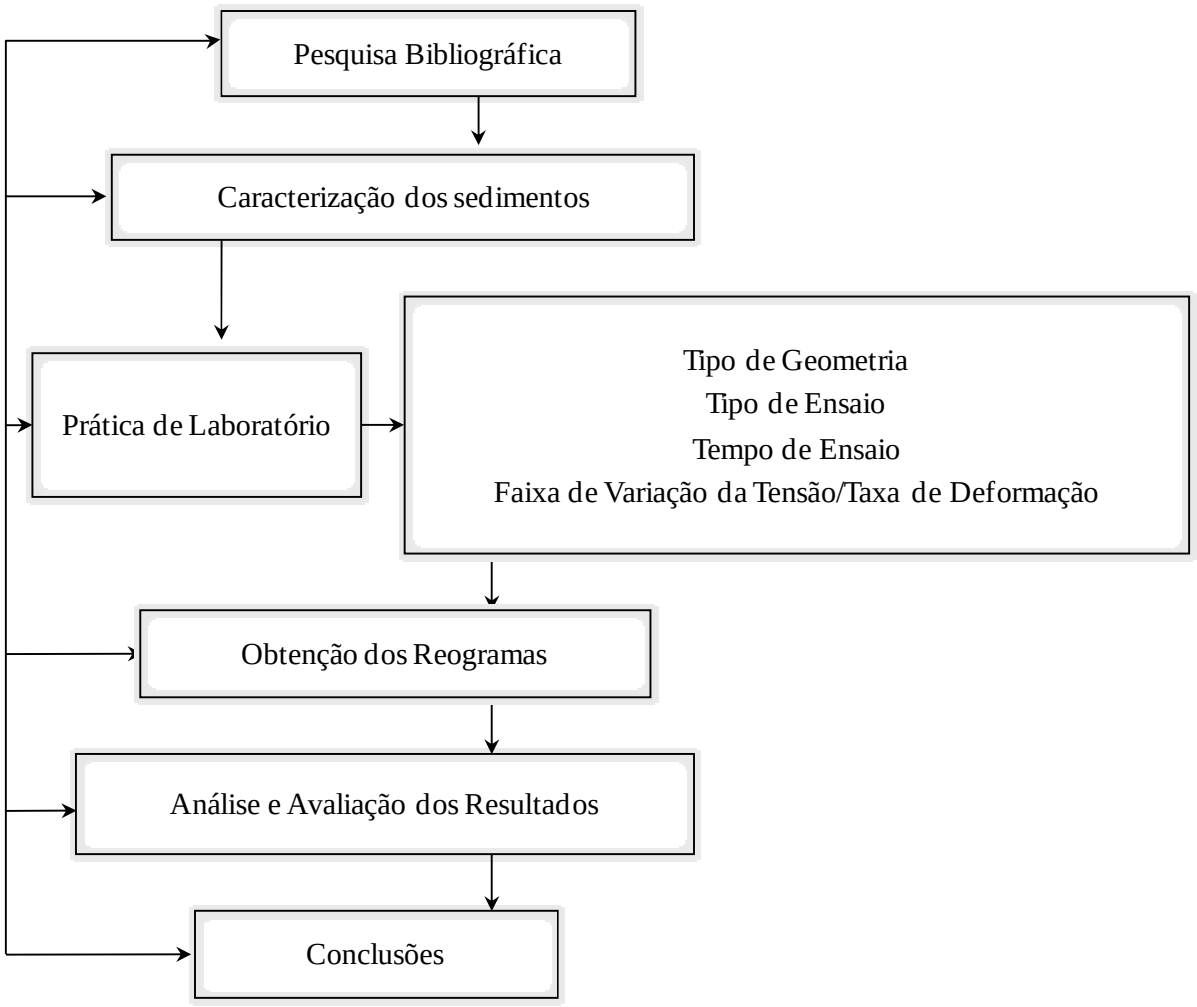
Tabela 1 – Composição da mistura e
concentração volumétrica usadas nos ensaios

Materiais	Composição da Mistura		Cv (%)
	Caulim	Carvão	
Argila e Carvão	100%	0%	5 - 7 - 15
	65%	35%	5 - 7
	60%	40%	
	55%	45%	
	50%	50%	
	0%	100%	

(fonte: elaborado pela autora)

Após a configuração no aplicativo do reômetro dos parâmetros a serem utilizados, as amostras foram submetidas aos ensaios. Com os dados dos ensaios reométricos, o aplicativo do reômetro ajusta o modelo reológico que melhor representa o comportamento das misturas ensaiadas. Em seguida, está representado na figura 1, o diagrama do delineamento da pesquisa.

Figura 1 – Diagrama do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

3 INTRODUÇÃO À REOMETRIA E A REOLOGIA

Misturas de suspensões geralmente oferecem uma resistência (viscosidade) ao cisalhamento, *a priori*, desconhecida. Por essa razão, o principal objeto de estudo é avaliar o comportamento mecânico da mistura. Nos próximos itens apresentam-se as ferramentas básicas para o entendimento da dinâmica de misturas de suspensões.

3.1 FLUIDOS E VISCOSIDADE

A distinção entre sólidos e líquidos pode ser feita ao se aplicar uma tensão de cisalhamento em ambos. O sólido pode resistir a uma tensão de cisalhamento, enquanto que o fluido não. As posições relativas dos elementos do fluido mudam significativamente quando forças são aplicadas no material. Fox e MacDonald (2001, p. 2) fazem a seguinte definição para um fluido: “Um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (tangencial), não importa quão pequena ela possa ser”. Alguns materiais não podem ser incluídos em nenhuma dessas classes, pois podem exibir um comportamento semelhante à primeira vista como um sólido, enquanto que em outras condições parecerão com fluidos.

Quando um fluido sofre deformação (ou flui) alguns de seus elementos se movem em relação uns aos outros. Durante esse processo, as partículas, em movimento relativo, desenvolvem algumas forças umas com as outras devido à transferência de quantidade de movimento resultante de suas interações.

Mais precisamente, uma tensão externa aplicada a um fluido tende a deformá-lo rapidamente, mas as forças de cisalhamento internas retardam a taxa de deformação e causam um estado de equilíbrio (COUSSOT, 1997, p. 26). Essa resistência é associada à noção de viscosidade. Portanto, tendo-se um suficiente entendimento da interação microesturtural dentro de um determinado material, uma relação apropriada entre as propriedades físicas e o comportamento mecânico do material pode ser estabelecida. Para isso, é interessante compreender os tipos dominantes de interações entre as partículas como, por exemplo, colisões e atrito, com alguns elementos básicos que podem estar presentes no fluido (grãos,

partículas de argila, etc.) e estudar como a distribuição e as mudanças nessas formas de interação durante o escoamento influenciam a resistência do fluido (COUSSOT, 1997, p. 27).

3.2 EQUAÇÃO CONSTITUTIVA

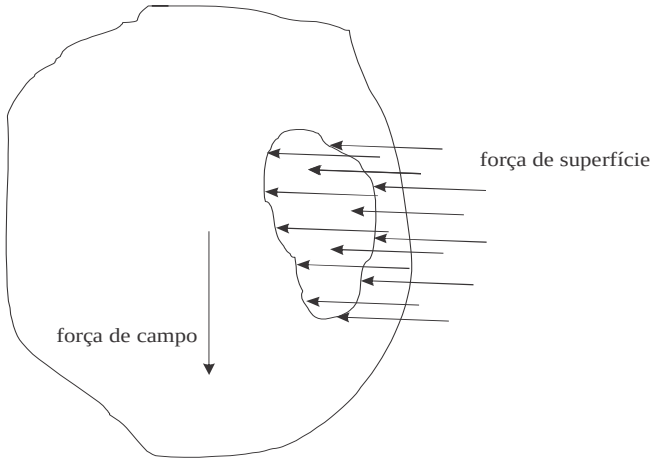
Uma das principais hipóteses para o tratamento da mecânica dos fluidos é a hipótese do meio contínuo. Esta implica que variáveis físicas, que assumem valores médios, podem ser continuamente diferenciadas no tempo e o espaço (FOX; MACDONALD, 2001, p. 10). Assim, será possível descrever as evoluções do fluido a partir de equações que relacionam variáveis e suas mudanças no espaço e no tempo. Isso abre a possibilidade para uma descrição quantitativa das propriedades do material e mais precisamente do seu comportamento mecânico.

Na prática, qualquer material é descontínuo conforme a escala de observação. Assim, o pressuposto do contínuo está ligado a uma gama de escalas de observações (no tempo e no espaço). Para validar e examinar se a hipótese do contínuo é válida, considera-se, por exemplo, as propriedades físicas de velocidade e densidade. A variação da densidade é mais fácil de prever e controlar, pois baseia-se em considerações geométricas, e é possível definir uma escala pequena de observação pela qual a hipótese do contínuo é valida para a densidade a partir de observação direta de como os componentes do material se distribuem no espaço. À escala de observação definida, a velocidade relativa entre dois elementos próximos deve ser pequena em comparação com qualquer diferença de velocidade macroscópica. No entanto, estas condições só constituem as condições básicas para a validade do pressuposto do contínuo e nem sempre são suficientes. Conforme já dito, a hipótese do contínuo deve ser sempre validada empiricamente por observações diretas ou por valores medidos em diferentes condições.

Neste trabalho, considera-se o caso específico de uma mistura (água + argila + carvão) que possui partículas de diferentes tamanhos e tipos na água, o que seria natural considerar *a priori* como uma mistura de duas fases. Isso significa que a mistura de cada partícula pode ser tratada separadamente tendo em conta a específica equação constitutiva dessa partícula e as várias interações com outros elementos da mistura. Contudo, em uma escala de observação macroscópica isso não é necessário, sendo então considerados com uma mistura de uma só fase (COUSSOT, 1997, p. 31).

Obviamente um material não flui por si mesmo. Há várias ações internas e externas que condicionam essa movimentação. De acordo com Batchelor[1] (1967 apud COUSSOT, 1997, p. 31), cada uma dessas ações representa uma força diferente que age em um elemento do material. Basicamente, as forças de interesse na dinâmica dos fluidos podem ser separadas em duas classes dependendo se elas são proporcionais à superfície ou ao volume do elemento (figura 2).

Figura 2 – Força de campo e de superfície



(fonte: elaborada pela autora)

As forças de superfície possuem uma origem molecular, que decrescem extremamente rápido com o aumento da distância entre os elementos que interagem e que são negligenciadas a menos que haja contato direto de um corpo com a superfície de outro. A segunda classe, isto é, as forças de campo ou de volume surgem quando um corpo exerce uma força sobre o outro sem contato físico direto entre eles que, em condições usuais, decrescem vagarosamente com um aumento na distância entre os elementos que interagem. A atração gravitacional e a força eletromagnética são exemplos de forças de campo.

Na mecânica dos fluidos, as leis estabelecem o que ocorre na interação entre um sistema (quantidade de massa de identidade fixa) e uma vizinhança (tudo o que é externo ao sistema). Dois princípios da conservação são importantes para o entendimento da interação entre o sistema e suas vizinhanças. O **princípio da conservação de massa** e o da **conservação da quantidade de movimento**. O primeiro expressa que, para um fluido ideal, não ocorre surgimento ou destruição de massa, ou seja, a massa deve ser conservada, e o segundo,

[1] BATCHELOR, G. K. **An introduction to fluid dynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.

expressa o fato de que é constante a quantidade de movimento de um sistema quando a resultante das forças externas for nula (COUSSOT, 1997, p. 32-33).

As mudanças no sistema são inteiramente determinadas pela equação da continuidade e pela equação da quantidade de movimento em conjunto com as condições de fronteira e iniciais. Para conseguir resolver essas equações, que possuem um grande número de termos desconhecidos, é necessário considerar a relação entre a velocidade e a superfície externa. É aqui que a equação constitutiva, a qual está diretamente vinculada com as propriedades do material, aparece, providenciando uma resposta para o problema (COUSSOT, 1997, p. 30).

Quando um material é submetido a uma tensão, os seus vários elementos se deslocam como resultado dessa força ou da deformação aplicada sobre ele. Essa distribuição de forças dentro do material evolui como uma função do tipo de configuração ou estado desses elementos (COUSSOT, 1997, p. 31). Contudo, levar em consideração as forças de superfície em materiais compostos de partículas de vários tipos e dimensões e suas possíveis interações, levaria a um conjunto extremamente complexo de equações que não permitiria uma abordagem realística (COUSSOT, 1997, p. 35). Dessa forma, assume-se uma equação constitutiva para todo o material.

Portanto, o comportamento do material do ponto de vista matemático, pode ser descrito por meio de uma equação constitutiva, a qual reflete o comportamento mecânico em termos da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

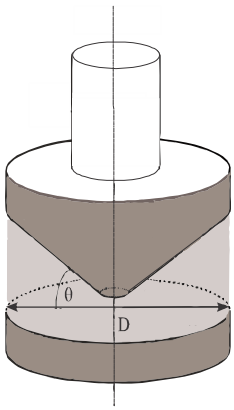
3.3 REOMETRIA

A reometria consiste na prática experimental para estabelecer as características físicas do material, através das grandezas de velocidade angular, torque, ângulo de deflexão e tempo, que possam ser transformadas em unidades de tensão e de taxa de cisalhamento e assim chegar a uma equação característica que descreva o comportamento do fluido. O reômetro foi o equipamento utilizado neste trabalho, no qual, mantendo o fluido confinado entre alguma geometria, como por exemplo, entre cilindros concêntricos ou placas paralelas, permite a medição da viscosidade.

A escolha do melhor *spindle* (dispositivo de aplicação de torque que pode apresentar diversas geometrias) para os ensaios requer cuidados, pois cada *spindle* possui condições de contorno específicas, sendo possível o surgimento de erros decorrentes das condições selecionadas. O fato, é que é muito difícil para qualquer fluido, encontrar um *spindle* que torne possível ter uma taxa de cisalhamento perfeitamente homogênea entre as geometrias de medição (cilindros concêntricos, placa paralela, cone e prato) (COUSSOT, 1997, p. 39).

O reômetro possui geometrias do dispositivo de medição como cilindros concêntricos, placa paralela e cone e prato que permitem medir as grandezas físicas do material. Para o caso do cone e prato (figura 3), o *spindle* é referido pelo ângulo do cone (θ) e pelo diâmetro (D).

Figura 3 – *Spindle* cone e prato



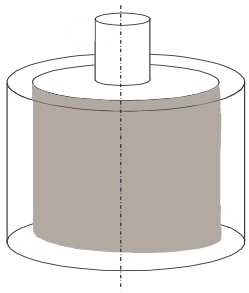
(fonte: baseado em COUSSOT, 2005, p. 34)

Considera-se o fluxo entre um cone e um prato de tal forma que o eixo do cone é perpendicular ao prato e o vértice do cone cai exatamente sobre a superfície do prato. O cone é truncado (a ponta do cone é retirada), a fim de evitar qualquer contato entre o cone e o prato, gerando uma força adicional e não controlada de atrito. Dessa forma, o cone deve ser posicionado a uma distância da placa pré-determinada. Diferentemente das outras geometrias (prato paralelo e cilindro-coaxial), essa geometria para a medição fornece valores homogêneos de taxa de cisalhamento (COUSSOT, 1997, p. 80-81).

A medição realizada entre cilindros concêntricos, também conhecido como cilindro-coaxial, (figura 4), considera um fluido contido e cisalhado entre os dois cilindros. Tal escoamento é geralmente chamado de **escoamento de Couette**. Neste caso, o cilindro interno gira em torno de seu eixo com uma determinada velocidade. Os efeitos de borda são insignificantes, o que equivale a dizer que o comprimento dos cilindros é infinito, e que nesse caso as variáveis do escoamento não dependem da direção do eixo. Sob essas condições, o campo de velocidade mais simples corresponde à velocidade radial e axial que devem ser iguais a zero. Se a componente do elemento radial ou axial da velocidade se afasta de zero em algum lugar, haverá um fluxo radial ou vertical para fora, que produzirá algum tipo de instabilidade no fluxo (COUSSOT, 2005, p. 35-36).

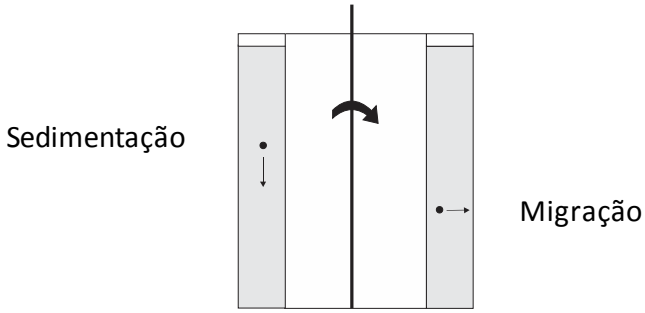
Nesse tipo de geometria para a medição pode-se observar dois fenômenos: a migração e a sedimentação de partículas (figura 5). No primeiro, as partículas grossas movem-se através de um material fino devido à rotação do cilindro. A importância está no tamanho, forma, ou densidade dos elementos que podem provocar movimento relativo entre si, provocando alguma heterogeneidade na concentração do material em uma escala macroscópica. 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 migração e sedimentação, em que a concentração da mistura torna-se heterogênea, levando a uma viscosidade não homogênea (COUSSOT, 2005, p. 146).

Figura 4 – *Spindle* cilindros concêntricos



(fonte: baseado em COUSSOT, 2005, p. 36)

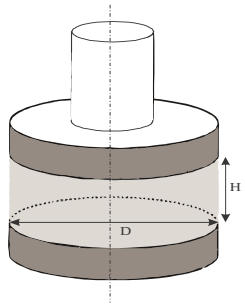
Figura 5 – Efeito da sedimentação e migração



(fonte: baseado em COUSSOT, 1997, p. 76)

Para o caso do dispositivo de dois pratos paralelos (figura 6) separados por uma distância H, o fluido é contido e cisalhado entre a geometria para a medição com uma rotação relativa e uma dada velocidade em torno de um eixo comum. Por causa da simetria do sistema com uma rotação em torno de um eixo central, a componente de velocidade e a tensão, *a priori*, não dependem de θ. Entretanto, a componente radial e axial da velocidade tende a empurrar o fluido para fora do seu volume inicial. A especificidade deste fluxo é que a tensão de cisalhamento é conhecida como uma função da velocidade de rotação, mas a taxa de cisalhamento resultante é altamente heterogênea, variando no eixo para um valor máximo no perímetro (COUSSOT, 2005, p. 31-32).

Figura 6 – *Spindle* pratos paralelos



(fonte: baseado em COUSSOT, 2005, p. 32)

Misturas que contém partículas podem apresentar propriedades reológicas particulares, e assim uma série de dificuldades experimentais (que levam a diferentes resultados) podem ser encontradas com os materiais durante a reometria de cisalhamento. Por isso pode ser necessário realização de várias repetições para extrair o comportamento reológico da mistura.

3.4 CONCEITOS BÁSICOS DE REOLOGIA

O nome reologia foi descrito pela primeira vez por Bingham[2] (1964 apud DORAISWAMY, 2002, p. 3) como sendo o estudo do fluxo e da deformação de todas as formas da matéria. Portanto, a reologia é uma ciência que se preocupa com a descrição do comportamento mecânico da matéria, ou seja, como um sólido se deforma, ou como um fluido flui, quando submetida a forças externas.

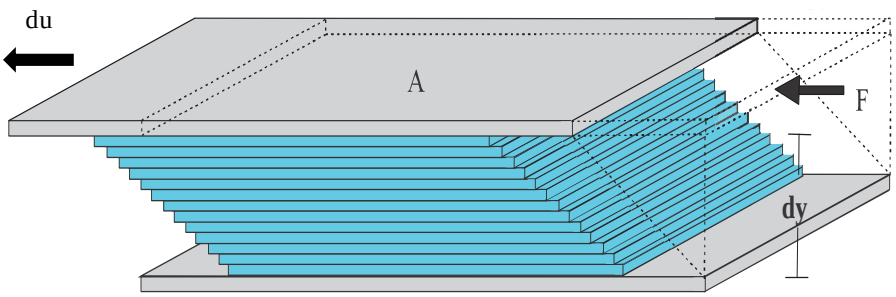
O estudo da reologia levou os pesquisadores a desenvolverem testes empíricos como o penetrômetro e o ensaio de abatimento (*slump test)*, em que o material está sujeito a forças ou movimentos e as reações em termos da espessura ou força, por exemplo, são registradas e usadas para comparar o comportamento de diferentes materiais. Essas técnicas servem para a indústria de concreto e de alimentos. Contudo, esses métodos não fornecem nenhuma informação importante relativa à equação constitutiva do material porque o parâmetro, como por exemplo, da velocidade, retratam apenas o comportamento do escoamento em um instante particular, não sendo, dessa forma, confiável para a caracterização do fluido (COUSSOT, 1997, p. 38).

Com o objetivo de determinar a reação de um fluido quando submetido a diferentes parâmetros, tais como: velocidade angular, torque, ângulo de deflexão e tempo, em um sistema controlado, será feita uma revisão de alguns conceitos básicos e terminologias específicas usadas para a caracterização reológica de materiais.

Como se pode observar na figura 7, um fluido contido entre duas placas paralelas de extensão infinitas sofre um deslocamento em função de uma força F aplicada na placa superior. Define-se F/A como sendo a **tensão de cisalhamento** ou tangencial (*shear stress*) aplicada no fluido. Este, consequentemente, experimenta uma **taxa de deformação ou cisalhamento** dada por *du/dy* (FOX; MACDONALD, 2001, p. 16).

[2] BINGHAM, E. C. Fluidity and Plasticity. **MacGraw-Hill**, 1922

Figura 7 – Deslocamento de um fluido entre placas infinitas



(fonte: baseado em FOX; MACDONALD, 2001, p. 16)

Isaac Newton[3] (1687 apud DORAISWAMY, 2002, p. 2) declarou sua famosa definição da resistência de um fluido (**denominada viscosidade dinâmica – μ**), que é uma propriedade chave de relevância para a reologia: a resistência que surge da falta de escorregamento originário de um fluido – ou outras coisas equivalentes – é proporcional à velocidade pelo qual as partes do fluido são separadas umas das outras.

Dessa forma, estabelece-se a equação reológica (fórmula 1):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu\gamma \qquad \text{(fórmula 1)}$$

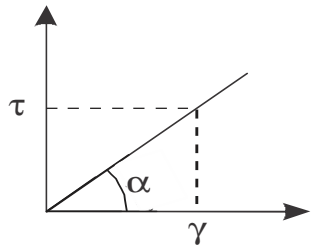
Onde:

$\gamma = du/dy$ é o gradiente de velocidade, taxa de cisalhamento ou taxa de deformação (s^{-1}).

Considera-se apenas o comportamento do fluido em condições de escoamento simples (fluxos com superfície livre), que corresponde à situação facilmente estudada em reômetros. Neste caso, pode-se fazer uma correlação entre a tensão e a deformação ocorrida em um fluido e representar seu comportamento graficamente (SCHRAMM, 2006, p. 29). Esse diagrama é chamado de **curva de fluxo, reograma ou diagrama reológico** e está representado na figura 8.

[3] O autor indica: NEWTON, I. S. **Philosophiae naturalis principia mathematics**. 1. ed. [S. l.; s. n.], 1687.

Figura 8 – Reograma para um fluido Newtoniano



(fonte: baseado em SCHRAMM, 2006, p. 29)

A equação que descreve o reograma é mostrada na fórmula 2:

$$\mu = \tan\alpha = \frac{\tau}{\gamma} \qquad \text{(fórmula 2)}$$

Onde:

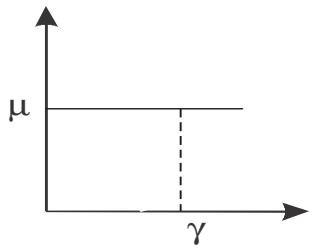
τ = tensão de cisalhamento (Pa);

γ = taxa de cisalhamento ou taxa de deformação (s^{-1});

μ = viscosidade dinâmica (Pa.s).

Outra maneira significativa de representar o comportamento do fluido é através da **curva de viscosidade,** na qual se relaciona a viscosidade com a taxa de cisalhamento (SCHRAMM, 2006, p. 29). O reograma, representada anteriormente, refere-se a um fluido que segue a lei de Newton e que possui uma correspondente curva de viscosidade representada na figura 9.

Figura 9 – Curva de viscosidade x taxa de cisalhamento para um fluido Newtoniano



(fonte: baseado em SCHRAMM, 2006, p. 29)

Os modelos reológicos apresentados no próximo item visam apenas representar algumas tendências observáveis dentro de uma determinada faixa de condições de escoamento e não propriedades físicas universais. Na verdade, com taxas de cisalhamento baixas ou altas, os desvios na linearidade nas curvas de fluxo podem aparecer, em função das características da mistura.

3.4.1 Classificação Reológica dos Fluidos

Como pode ser observado, o reograma da figura 4 equivalente a sua equação é representada por uma reta com início na origem, mostrando uma proporcionalidade entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento. A viscosidade desse tipo de fluido é única e constante e não é afetada por mudanças na taxa de cisalhamento. Dessa forma, os fluidos com esse tipo de comportamento são chamados de **Newtonianos** (FOX; MACDONALD, 2001, p. 16). Como exemplo de fluidos Newtonianos pode-se citar: ar, água, glicerina, óleos, xaropes e mel.

Todos os outros fluidos, que não apresentam um comportamento linear, são denominados **fluidos não Newtonianos.** Para esses, a viscosidade não é única, variando conforme a magnitude da taxa de cisalhamento. Essa viscosidade é chamada de **viscosidade aparente**, isto é, a viscosidade que o fluido teria se fosse Newtoniano naquela condição de fluxo (FOX; MACDONALD, 2001, p. 18).

Ela é expressa pela relação (fórmula 3):

$$\mu_a = \frac{\tau}{\gamma} \qquad \text{(fórmula 3)}$$

Onde:

μ_a = viscosidade aparente (Pa.s);

γ = taxa de cisalhamento ou taxa de deformação (s^{-1});

τ = tensão de cisalhamento (Pa).

Encontra-se esse comportamento complexo, por exemplo, nas dispersões de argila em água, nas emulsões concentradas de óleo em água, nas soluções de polímero e nas misturas asfálticas.

A viscosidade dos fluidos não Newtonianos 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 a uma tensão de cisalhamento constante, o fluido apresenta **tixotropia negativa** (FOX; MACDONALD, 2001, p. 19).

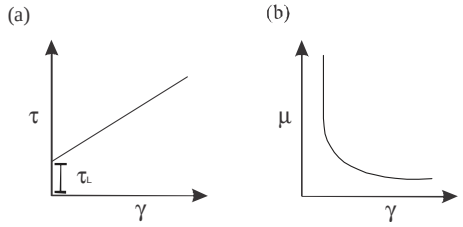
Os materiais que se comportam conforme o **Modelo de Bingham** são denominados de plásticos de Bingham**.** Estes fluidos possuem uma resistência inicial que os impedem de fluir, logo, para que ocorra uma deformação, é necessária a aplicação de uma tensão mínima denominada **limite de escoamento** ou **tensão de escoamento crítica**. A equação matemática que define o plástico de Bingham é expressa por (fórmula 4) (BINGHAM[4], 1922 apud SANTOS, 2003):

$$\tau = \mu_p \gamma + \tau_L \qquad \text{(fórmula 4)}$$

Onde:
μ_p = viscosidade plástica (Pa.s);
τ_L = limite de escoamento ou tensão de cisalhamento crítica (Pa).

O reograma e a curva de viscosidade do Modelo de Bingham são mostrados na figura 10.

Figura 10– (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do plástico de Bingham



(fonte: baseado em SCHRAMM, 2006, p. 29)

[4] BINGHAM, E. C. **Fluidity and plasticity**. 1 ed. MacGraw-Hill, 1922.

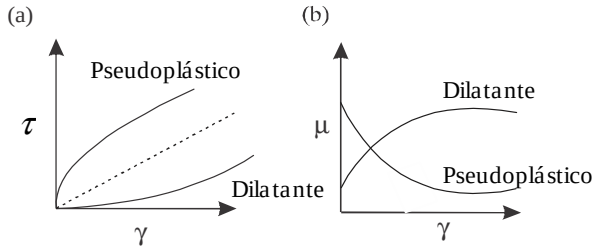
Outro modelo de comportamento do fluido é o **Modelo de Ostwald de Waale**, também conhecido como Lei de Potência. Seu modelo matemático é dado pela fórmula 5 (OSTWALD[5], 1925 apud SANTOS, 2003):

$$\tau = k(\gamma)^n \qquad \text{(fórmula 5)}$$

Onde:
τ = tensão de cisalhamento (Pa);
γ = taxa de cisalhamento (s^{-1});
k = índice de consistência ($Pa.s^n$);
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 11, 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, p. 18).

Figura 11 – (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do modelo Lei de Potência

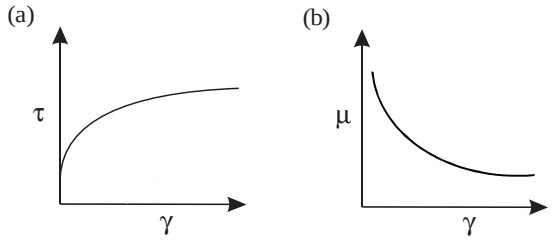


(fonte: baseado em SCHRAMM, 2006, p. 29)

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

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, o limite de escoamento (τ_L). As respectivas curvas de fluxo e de viscosidade são mostradas na figura 12.

Figura 12 – (a) reograma e; (b) curva de viscosidade do modelo de Herschel-Bulkley



(fonte: baseado em SCHRAMM, 2006, p. 29)

O modelo matemático de Herschel-Bulkley é mostrado na fórmula 6 (HERSCHEL; BULKLEY[6], 1926 apud SANTOS, 2003):

$$\tau = \tau_L + k\gamma^n \qquad \text{(fórmula 6)}$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

τ_L = limite de escoamento ou tensão de cisalhamento crítica (Pa);

k = índice de consistência ($Pa.s^n$);

γ = taxa de cisalhamento (s^{-1});

n= índice de comportamento ou de fluxo.

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

3.4.2 Reologia de Suspensão

Suspensões são sistemas heterogêneos, constituídos de partículas sólidas, dispersas e distribuídas em um líquido. Misturas com suspensões podem ter sua origem em processos naturais e industriais. Na natureza, as misturas aparecem nos fluxos de lama, os quais são escoamentos decorrentes de deslizamento de encosta ou de enxurradas e também podem estar presentes nos rios, nos estuários e no mar. Na indústria, por exemplo, tem-se a produção de concreto fresco, de sucos e de *ketchup*. Famílias de misturas de sólido-líquido constituem suspensões cujo comportamento é complexo devido a várias origens.

As propriedades reológicas resultam da transferência de quantidade de movimento devido à interação das partículas. A intensidade dessas interações pode mudar com o tempo e com as características do fluxo, o que induz mudanças na resistência de escoamento. Coussot (1997, p. 45, 106-107) enumera cinco tipos de efeitos que influenciam a transferência de quantidade de movimento: hidrodinâmico, de empacotamento, coloidal, de inércia e o movimento Browniano. Contudo, outros parâmetros também podem exercer influência no escoamento de uma suspensão, como a temperatura, o pH, o tamanho e a forma da partícula, além do tipo de sedimento do fluido.

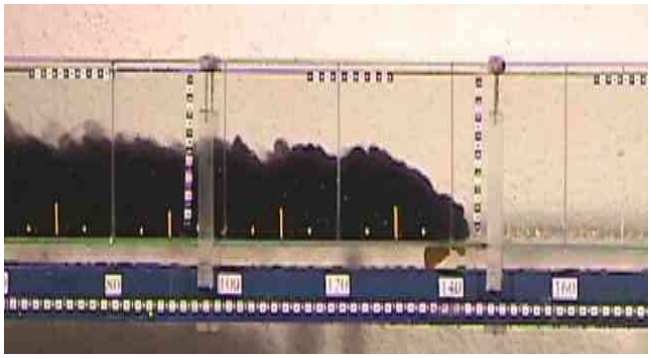
Wang et alli (1994, p. 514) verificaram em seu trabalho que o comportamento reológico das suspensões de sedimento fino (caulim) é diferente das suspensões de sedimento grosso (areia). Essa diferença deve-se à composição diversificada do mineral ao invés do seu diâmetro. Suspensões de sedimentos finos (diâmetro menor que 0,0 1mm) geralmente comportam-se como um fluido plástico de Bingham e suspensões de sedimentos grossos (diâmetro médio maior que 0,05 mm) apresentam um comportamento Newtoniano. O autor observou que suspensões de argila, com diferentes cátions, apresentam consideráveis diferenças em suas propriedades reológicas.

Partículas suspensas suficientemente pequenas, como as argilas, podem apresentar efeitos coloidais. Essas partículas possuem, em escala molecular, uma forte atração devido às forças eletrostáticas conhecidas como forças de Van der Walls. Em uma suspensão, as partículas de argila são atraídas umas pelas outras formando partículas maiores, ou seja, se unem para formar agregados, cuja estrutura formada é responsável pelo comportamento não Newtoniano desse tipo de suspensão. Devido ao fato das argilas em se unirem (formarem agregados), elas

são consideradas o material ativo em uma mistura e, as outras partículas, como material inerte.

Na natureza, as correntes de turbidez (figura 13) são fluxos gerados pela diferença de densidade entre fluidos ocasionada pela presença de sedimentos em suspensão. O comportamento desse tipo de fluxo é dependente dos efeitos viscosos que podem desempenhar um papel significante na dinâmica do fluxo. Muitos trabalhos (DÜCKER, 2007; PUHL, 2007; MANICA, 2002, 2009; BOFFO, 2010) têm sido realizados buscando entender o comportamento hidrodinâmico e deposicional desses escoamentos, para os quais, a fim de obter um entendimento completo do fenômeno natural, é importante estabelecer as características reológicas das misturas presentes no fluxo e seu comportamento mecânico.

Figura 13 – foto de uma corrente de turbidez simulada em laboratório



(fonte: Necod)

Com esse intuito, Manica (2009, p. 148) realizou diversos ensaios com diferentes concentrações de caulim, simulando a presença de argila, e esferas de vidro ($\rho = 2600$ kg/m^3), que simulou a presença de frações finas e silte. Os resultados da mudança de comportamento linear para um comportamento não linear de diversas composições e concentrações das misturas podem ser vistos na tabela 2.

Tabela 2 – Comportamento reológico de misturas de argila e esfera de vidro para diversas concentrações

Materiais	Composição da Mistura	Cv (%)	Modelo Reológico
Argila e Esfera de Vidro	100% esfera de vidro	2 - 5 - 10 -15 - 20 - 25 - 30 - 35	Newton
	50% argila 50% esfera de vidro	35 30 25 20	Herschel-Bulkley
		15 10 5 2,5	Newton
	100% argila	25 20 15 10	Herschel-Bulkley
		5 2,5	Newton

(fonte: baseado em MANICA, 2009)

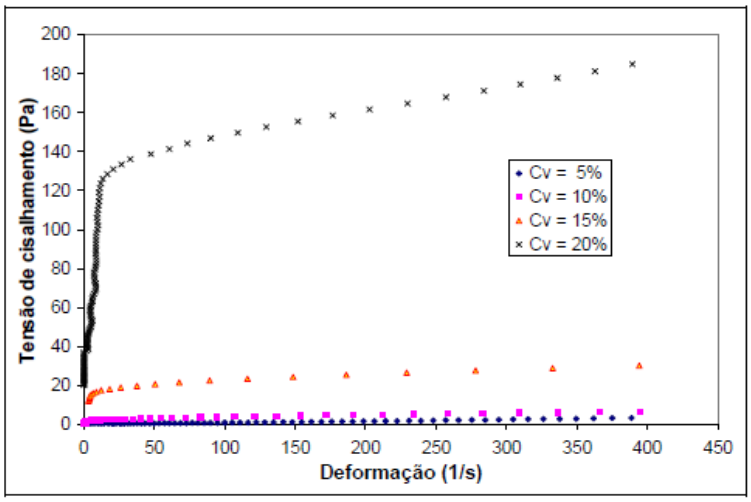
Tarqui (2001) utilizou um viscosímetro Broakfield modelo DV Loader II + para caracterizar reologicamente três tipos de solos que apresentam diferentes características de textura e mineralogia: solo Brunizén Vertico (mineralogia Esmectítico), Terra Roxa (caulinitico) e Vertissolo (caulinitico). Os solos que continham mais de 55% de argila na sua composição apresentaram um comportamento de fluido de Bingham para uma concentração volumétrica de quase 6%. Para as concentrações volumétricas abaixo de 2%, a mistura se comportou como um fluido Newtoniano. O solo Brunizén, que continha menos de 40% de argila, apresentou um comportamento Newtoniano.

No trabalho de Kiryu (2006, p. 166), no qual foram ensaiadas misturas de areia fina, argila e água, verificou-se que as amostras com baixa presença de partículas de argila apresentaram reogramas quase lineares como fluidos Newtonianos, no entanto, as misturas com altas concentrações seguiram o modelo viscoplástico de Herschel-Bulkley. Esses resultados corroboram o fato de que fluidos com pequenas concentrações de sedimentos permanecem com propriedades Newtonianas, podendo, no entanto, apresentar um aumento de viscosidade, a qual dependente da concentração.

É sabido que, quando se aumenta a fração de sólidos (mantendo outros parâmetros constantes), ocorre uma maior variação dos valores de tensão de cisalhamento no reograma

correspondente (COUSSOT, 1997, p. 103) Isso pode ser visto no caso das suspensões de argila caulinítica da figura 14.

Figura 14 – Reograma com diversas concentrações em volume Cv para T = 20°C



(fonte: SANTOS, 2003, p.44)

Com relação aos ensaios de concentração volumétrica de 15% e 50% de areia e 10% de sólidos e 10% de areia, Santos (2003, p. 55-56) percebeu que a influência no comportamento reológico deveu-se a quantidade diferente de argila nas misturas e não à variação de concentração volumétrica, pois os parâmetros reológicos (k, n e σ_L) dos ensaios foram praticamente os mesmos. Na tabela 3 podem ser vistos os resultados da mudança de comportamento de diversas misturas ensaiadas pelo autor. A diferença de comportamento é influenciada pela quantidade de argila, que é o material ativo, a qual pode absorver as moléculas de água levando as misturas a apresentarem uma fluidez diferente.

Tabela 3 – Comportamento reológico de misturas de argila e areia
para diversas concentrações

Materiais	Composição da Mistura	Cv (%)	Modelo Reológico
Argila e Areia	100% argila	5	Newton
		10 - 15 - 20	Herschel-Bulkley
	50% argila 50% areia 90% argila 10% areia	10 - 15	Herschel-Bulkley

(fonte: baseado em SANTOS, 2003)

Manica (2009), Kiryu (2006) e Santos (2003) mostraram em suas análises reológicas que uma mistura com presença de partículas pequenas e com coesão, como a argila, faz com que a presença deste elemento seja o fator que mais afeta a mudança das propriedades físicas do fluido de mistura de água e sedimento e, por consequência, de seu comportamento reológico.

A mistura de sedimento (carvão e caulim) usada neste trabalho é utilizada na simulação física de correntes de densidade no Necod/IPH/UFRGS. O comportamento dinâmico dessa mistura é análogo aos escoamentos que ocorrem na natureza, nas quais as frações finas, simulada pelo caulim, desempenham um papel importante no transporte das frações mais grossas, simulada pelo carvão.

4 MATERIAIS, EQUIPAMENTO E MÉTODO

O comportamento reológico das mistura está relacionado às características físicas dos minerais que a compõem. Dessa forma, os materiais foram caracterizados através da massa específica, da composição, do tamanho e da distribuição granulométrica das partículas. A caracterização dos sedimentos também contribuiu para a fixação de parâmetros para o desenvolvimento da metodologia experimental

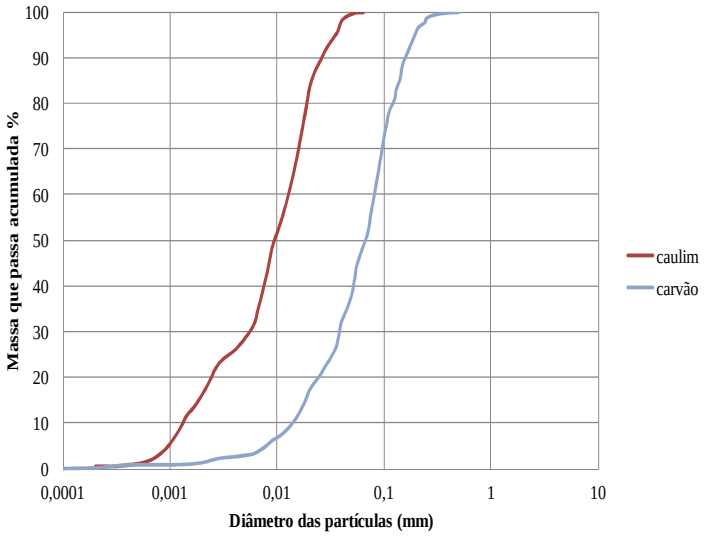
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os sedimentos na natureza não são uniformes, sendo constituídos de partículas de origem, de tamanho e de proporções variadas. O termo argila é usado para identificar partículas de granulação fina, independente da sua composição química ou mineralógica, com diâmetro inferior a 0,004 mm. Dos diversos tipos de argila, o caulim é um mineral formado por unidades de silício (SiO_2) e de alumínio (Al_2O_3) unidas alternadamente, cuja estrutura rígida lhe permite ser um mineral relativamente estável em presença de água, conferindo-lhe uma menor plasticidade. A menor fluidez da mistura de caulim e água deve-se ao fato que as partículas sólidas do caulim, em contato com a água, atraem seus íons formando uma película de água adsorvida e diminuindo assim a quantidade de água livre O caulim utilizado nessa pesquisa foi adquirido junto à empresa Raabe Calcários Ltda. de Pantano Grande/RS, apresenta uma massa específica de 2600 kg/m^3. Quanto a sua forma, é classificado como lamelar (CAPUTO, 1973, p. 25).

O carvão utilizado nos ensaios é o 205 do tipo Cardiff, obtido junto à empresa Rio Deserto S.A., de Criciúma/SC, que apresenta uma massa específica de 1190 kg/m^3. É classificado quanto a sua forma, como angular e semiarredondado e possui diâmetros na classe de areia muito fina, segundo a AGU (*American Geologist Union*) (MANICA, 2002, p. 49).

Com o uso do granulômetro foram obtidas as distribuições granulométricas do caulim e do carvão (figura 15) e os valores de diâmetro médio de grão do carvão (101,2 micra) e do caulim (13,8 micra).

Figura 15 – distribuição granulométrica



(fonte: elaborada pela autora)

A caracterização reológica da mistura estudada depende direta ou indiretamente da proporção de partículas sólidas no volume total da mistura. Essa proporção pode ser calculada como a concentração em volume do material (Cv), e foi determinada a partir da massa específica (fórmula 7):

$$C_V = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_S - \rho_a} \qquad \text{(fórmula 7)}$$

Onde:

ρ_m= massa específica da mistura de água e sedimento (kg/m^3);

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

ρ_s= massa específica do grão (kg/m^3).

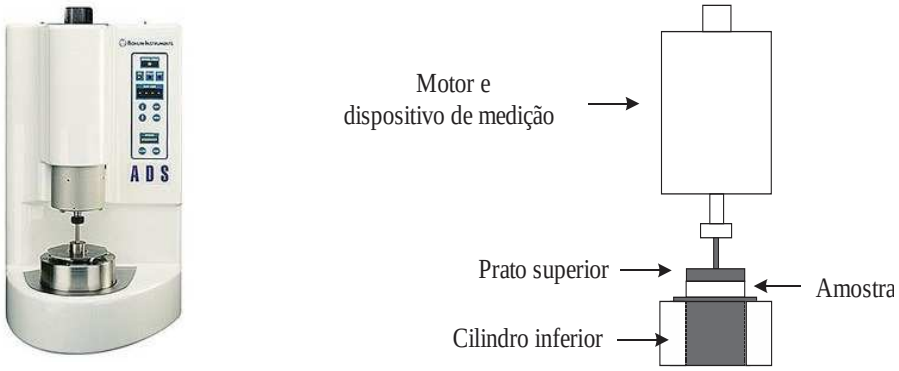
4.2 EQUIPAMENTO

A caracterização reológica nesse trabalho foi realizada com um reômetro C-VO da marca Bolhin (figura 16), que oferece três tipos diferentes de teste (viscometria, oscilação e fluência). O maior interesse para esse estudo é o teste que realiza a medição da viscosidade.

O funcionamento do equipamento baseia-se em um motor de indução controlado eletronicamente, que incorpora um rolamento a ar capaz de sustentar e de reunir numa cavidade oca um eixo rotativo. Esse sistema impede qualquer contato entre as partes fixas e móveis, garantindo precisão na realização das medidas de torque e velocidade angular, os quais são posteriormente convertidos em tensão e taxa de deformação da mistura. Na extremidade inferior do eixo, uma rosca prende o componente do dispositivo da geometria de medição superior e o cilindro inferior não rotativo, do conjunto de medição, é fixo (figura 16). O equipamento ainda possui uma unidade de controle de temperatura do tipo Peltier, que permite o ajuste da temperatura desejada dentro do cilindro inferior (controle a 0,1° C), e, portanto, dentro da amostra, garantido dessa forma um valor constante de temperatura ao longo da realização do ensaio.

O teste que mede a viscosidade do fluido pode operar de dois modos: com o controle da tensão ou com o controle da taxa de cisalhamento. Do primeiro modo, o reômetro aplica um valor de torque constante no motor o qual é detectado por um sensor conectado ao sistema. Um aplicativo converte o valor de torque em tensão de cisalhamento. A leitura do sensor é convertida em deformação, cujo monitoramento ao longo de um tempo permite transformá-la em tensão de cisalhamento. Na segunda forma de funcionamento, o reômetro aplica uma velocidade constante no motor e um torque é detectado e medido pelo sistema.

Figura 16 – Reômetro



(fonte: baseado em CHHABRA; RICHARDSON, 2008, p. 90)

O *Spindle* (figura 17) é um acessório com os qual se realiza os testes de cisalhamento. Sua escolha foi feita com base em uma combinação adequada dentre os parâmetros selecionados, que foram obtidos na prática de laboratório.

Figura 17 – *Spindle*

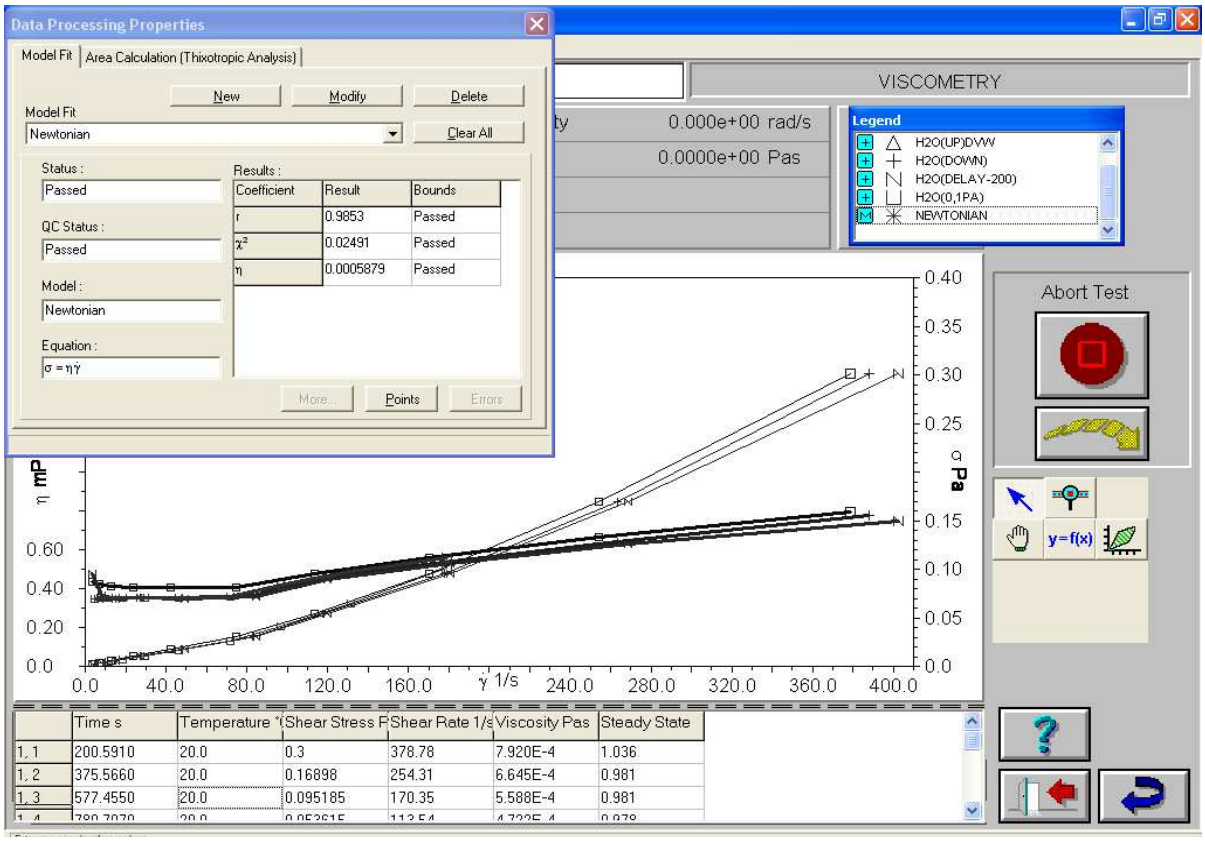
(fonte: elaborada pela autora)

4.3 METODOLOGIA

A viscosidade não é como a temperatura ou a massa, que possuem valores absolutos e que não mudam com o tempo ou o método de medição, portanto o valor da viscosidade será em função de como se realiza a medição do fluido. Por isso, uma série de testes foi realizada para fixar parâmetros que poderão ser reproduzidos e assim o valor da viscosidade encontra-se determinado dentro de um sistema controlado. Por meios desses testes, foi determinada a metodologia de uso do reômetro, pela qual fixou-se a faixa de variação das tensões e da taxa de deformação a serem aplicadas, o tempo de ensaio, o tipo de ensaio e a escolha dos modelos de geometrias do *spindle* (cone e prato, cilindro-coaxial ou prato paralelo).

Inicialmente as misturas eram preparadas em potes separados e a metodologia de operação do reômetro consistia em colocar a geometria selecionada no equipamento e com o uso de uma seringa, a quantidade de aproximadamente 1,5 ml de fluido entre as geometrias de medição. Os parâmetros do ensaio foram ajustados no próprio aplicativo do reômetro. 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 18).

Figura 18 – Tela de resultados do teste



(fonte: elaborada pela autora)

5 RESULTADOS

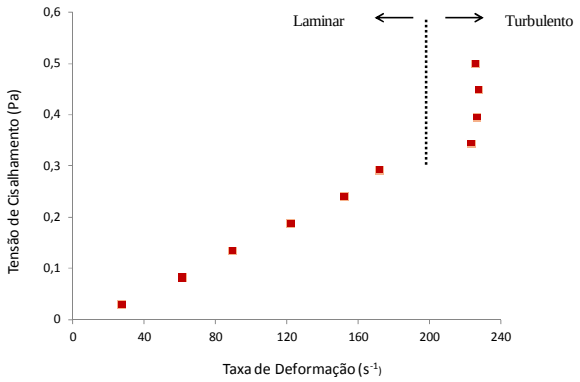
Durante o ajuste da metodologia do reômetro, foram testados e aplicados diversos parâmetros de ensaio os quais resultaram definidos conforme abaixo descrito.

5.1 RESULTADOS PRELIMINARES

A geometria de cone e prato, que fornece valores homogêneos de taxa de cisalhamento, foi inicialmente descartada, pois Coussot (1995, p. 3971) verificou que a distância entre as geometrias deve ser no mínimo 25 vezes o tamanho das maiores partículas sólidas. Nesta geometria para a medição, a distância entre as geometrias designada pelo fabricante (0,15 mm) é menor que o tamanho máximo do grão de carvão (0,6 mm). Diante da opção de utilizar a geometria prato paralelo ou cilindro-coaxial (ambas fornecem valores heterogêneos de taxa de cisalhamento), optou-se pela primeira geometria devido a sua facilidade de manuseio e limpeza. Desta forma, utilizou-se um prato com diâmetro de 40 mm (PP 40) e fixou-se a altura entre as geometrias em 1,1 mm.

O valor da tensão inicialmente adotado (0 a 2 Pa) levou a amostra a escoar em regime turbulento, provocando erros nas medidas (figura 19). Esse comportamento foi observado para uma faixa de valores máximos de tensão de 0,8 a 2 Pa. Em virtude disso, a fim de preservar a amostra em regime laminar, a faixa de tensão adotada para a realização dos ensaios foi de 0 a 0,3 Pa (para as concentrações de 5% e 7%). Esse intervalo de valores foi modificado para 0 a 2,5 Pa quando se trabalhou com a concentração de 15%.

Figura 19 – mudança do regime de escoamento em um reograma



(fonte: elaborada pela autora)

Em parte, devido a sua capacidade de produzir taxas de cisalhamento extremamente baixas, o uso do modo de tensão controlada tem sido justificado por ser altamente adequado para a determinação da tensão de cisalhamento crítica, e a este respeito, este modo tende a ser mais bem sucedido do que o modo de taxa de cisalhamento controlada. Isso geralmente é atribuído ao fato de que, para baixas tensões, a estrutura do material pode ser preservada sob as condições de teste (CHHABRA; RICHARDSON, 2008, p. 90).

No ensaio de viscosidade o aplicativo do equipamento monitora quão **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 22 min e do ensaio da água, 37 min.

A separação de fases foi observada em algumas amostras no tempo transcorrido entre a colocação da amostra na geometria para a medição e o início do teste (quando a amostra estava em repouso). Principalmente por se trabalhar com misturas particuladas, cujas partículas tendem a sedimentar a baixos valores de cisalhamento e a sofrer ressuspensão a velocidades mais altas, os resultados experimentais obtidos com o auxílio do reômetro requerem uma análise cuidadosa. Dessa forma, fica clara a necessidade da realização de repetições dos ensaios durante a reometria de cisalhamento.

Aplicando a metodologia e os parâmetros definidos neste capítulo os resultados da caracterização reológica das misturas serão apresentados no que segue.

5.2 AJUSTE DO MODELO REOLÓGICO

Na tabela 4 apresentam-se os resultados estatísticos obtidos dos ajustes dos modelos. Os altos valores do coeficiente de determinação (R^2) evidenciam uma boa correlação entre os dados, entretanto o valor da viscosidade da amostra que contém apenas carvão com Cv 5% encontra-se abaixo do valor da viscosidade da água, o que indica que o ensaio deve ser repetido.

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos do ajuste dos modelos reológicos

Composição da Mistura		Cv	σ_L	Viscosidade Dinâmica - μ	n	R^2
Caulim	Carvão					
100%	0%	5%	-	0,00160	1	95,94
65%	35%		-	0,00149	1	97,76
60%	40%		-	0,00139	1	98,69
55%	45%		-	0,00123	1	97,97
50%	50%		-	0,00137	1	98,36
0%	100%		-	0,00107	1	96,98
Água			-	0,00110	1	98,33

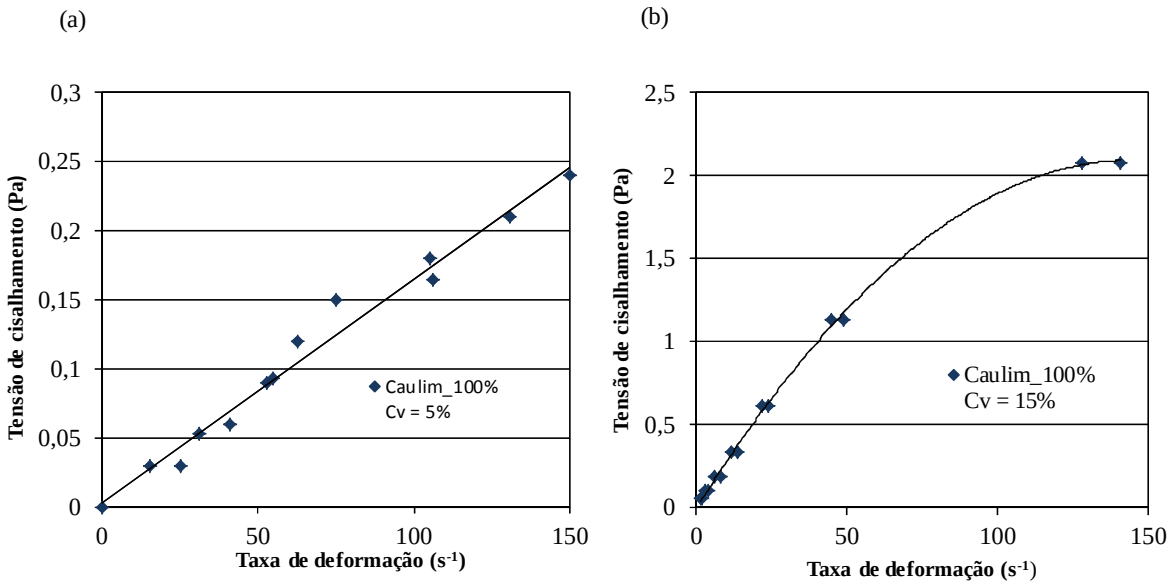
Composição da Mistura		Cv	σ_L	Viscosidade Dinâmica - μ	n	R^2
Caulim	Carvão					
100%	0%	7%	-	0,00212	1	90,85
65%	35%		-	0,00200	1	99,30
60%	40%		-	0,00195	1	98,59
55%	45%		-	0,00177	1	98,09
50%	50%		-	0,00194	1	99,05
0%	100%		-	0,00170	1	97,94

Composição da Mistura		Cv	σ_L	k	n	R^2
Caulim	Carvão					
100%	0%	15%	0,057	0,1108	0,5959	96,07

(fonte: elaborada pela autora)

Para as concentrações de 5% e 7% o modelo reológico que melhor se ajustou aos resultados dos experimentos foi o modelo de Newton, e para a concentração de 15%, o modelo reológico que apresentou os melhores resultados foi o modelo de Herschel-Bulkley. A figura 20 apresenta as tendências de comportamento das misturas ensaiadas.

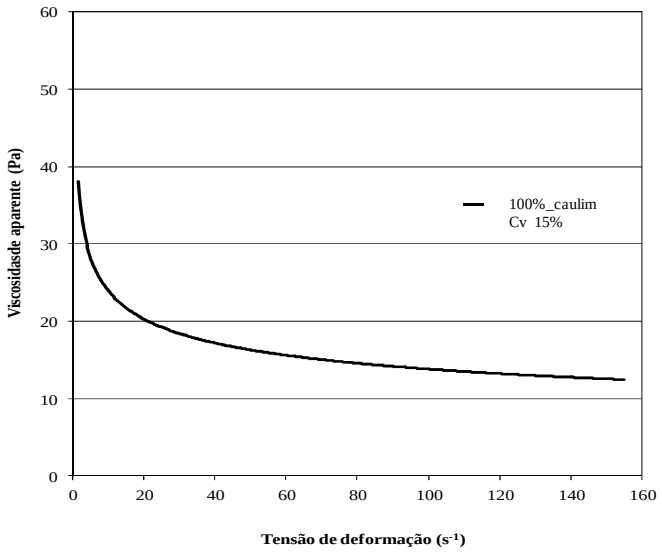
Figura 20 – Tendência de comportamento (a) Cv 5% de 100%_ caulim;
(b) Cv 15% de 100%_caulim



(fonte: elaborada pela autora)

Os valores da viscosidade dinâmica foram determinados diretamente da curva tensão-deformação que foram corrigidos dos valores medidos pelo equipamento (medida de várias repetições dos ensaios). Para a concentração de 15%, o fluido não apresentou um comportamento linear, não permitindo a determinação da viscosidade de forma direta (coeficiente angular da curva). Os valores da viscosidade dinâmica foram adimensionalizados pelo valor da água pura para fins de comparação com os resultados de outros autores. A tabela 5 demonstra esses resultados.

Figura 21 – Curva de viscosidade para Cv 15% de 100%_caulim



(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 5 – Viscosidade relativa para Cv 5% e 7%

Composição da Mistura		Cv	Viscosidade Dinâmica - μ	Viscosidade Relativa - μ/μ_0
Caulim	Carvão			
100%	0%	5%	0,00160	1,45
65%	35%		0,00149	1,35
60%	40%		0,00139	1,26
55%	45%		0,00123	1,12
50%	50%		0,00137	1,25
0%	100%		0,00107	0,97
Água			0,00110	1

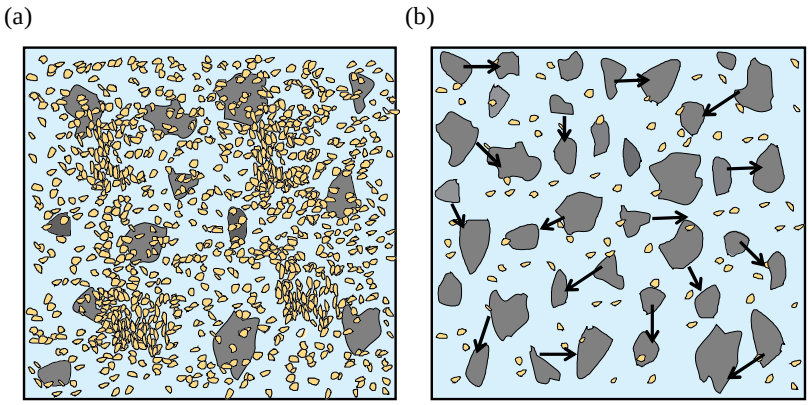
Composição da Mistura		Cv	Viscosidade Dinâmica - μ	Viscosidade Relativa - μ/μ_0
Caulim	Carvão			
100%	0%	7%	0,00212	1,93
65%	35%		0,00200	1,82
60%	40%		0,00195	1,77
55%	45%		0,00177	1,61
50%	50%		0,00194	1,76
0%	100%		0,00170	1,55
Água			0,00110	1

(fonte: elaborada pela autora)

Nota-se na tabela 5 que os valores de viscosidade relativa crescem para as amostras com mais de 55%_caulim. O aumento da viscosidade deve-se as propriedades coesivas do caulim. Ao atrair as moléculas de água para a sua superfície forma-se uma película de água adsorvida, o que diminui a quantidade de água disponível para envolver as partículas inertes (figura 22).

A amostra com 50%_caulim_50%_carvão não seguiu uma tendência de crescimento da viscosidade. Isso sugere que existe uma faixa de valores em que a quantidade de carvão é que exerce maior influência na viscosidade. É possível que as amostras nas quais a quantidade de carvão é maior do que a quantidade de caulim provoque a mudança nas propriedades reológicas. O aumento da viscosidade, neste caso, pode ser resultante do choque entre as partículas, tendo em vista as características atritivas do carvão (figura 22).

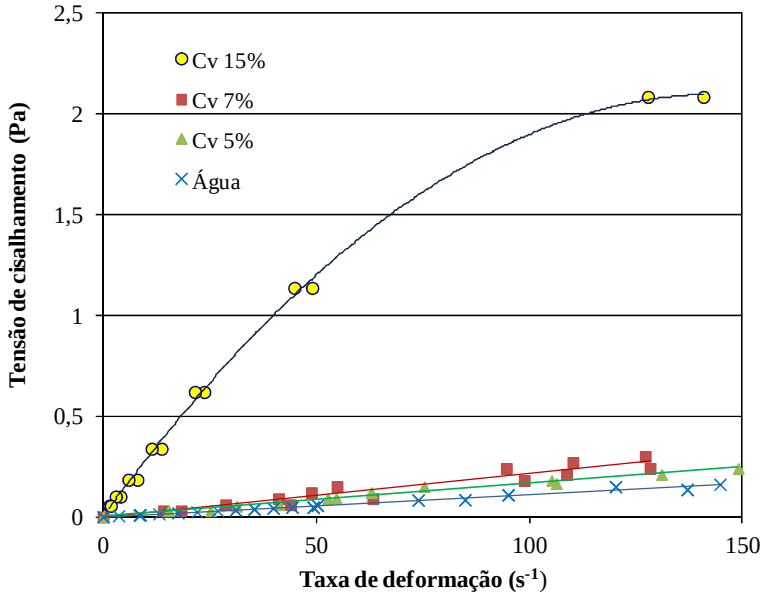
Figura 22 – (a) mistura com maior quantidade de caulim; (b) mistura com maior quantidade de carvão



(fonte: elaborada pela autora)

Conforme visto na literatura, foi possível observar que a variação da concentração volumétrica influencia na relação tensão-deformação das misturas (figura 23). Como demonstrado na tabela 5, o aumento da quantidade de partículas sólidas presentes no fluido levou a um aumento da viscosidade do mesmo.

Figura 23 – Reograma das Cv de 5% e 7% das amostras com 100%_caulim

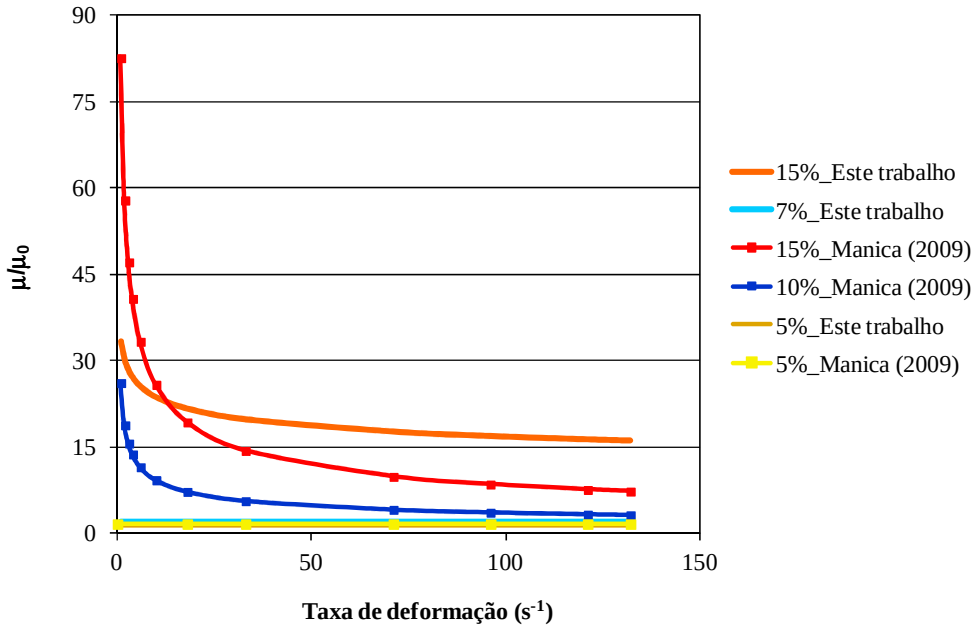


(fonte: elaborada pela autora)

5.3 RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE VISCOSIDADE RELATIVA E A TAXA DE DEFORMAÇÃO

Considerando o trabalho de Manica (2009), em que o autor trabalhou com esferas de vidro e caulim, comparou-se os resultados para os 3 tipos de composição de misturas usadas neste trabalho: apenas caulim ou carvão e uma composição idêntica dos dois sedimentos (50%). O autor também utilizou o mesmo equipamento, porém com a geometria do tipo cone e prato. A figura 24 mostra a relação entre duas variáveis reológicas, a viscosidade relativa e a taxa de deformação para as amostras que continham apenas caulim.

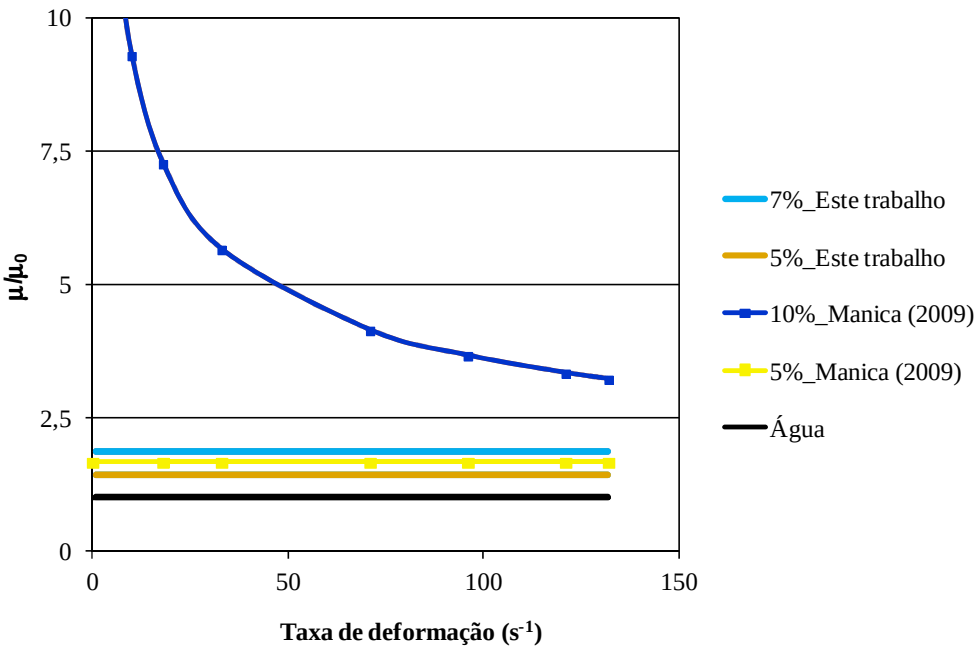
Figura 24– Comparação da relação entre a viscosidade relativa e taxa de deformação com os dados de Manica (2009) para amostras com 100%_caulim de Cv 5, 7, 10 e 15%



(fonte: elaborada pela autora)

Observa-se na figura 24, para a concentração de 15%, valores bem distintos de viscosidade, mas com um comportamento da curva similar. Nota-se na figura 25 (detalhamento da figura 24) que para a concentração de 5% a mistura apresentou um comportamento linear com valores próximos das do autor. Verifica-se pelo gráfico, que a mistura de concentração de 10% do autor possui um comportamento pseudoplástico, e a mistura de concentração de 7% deste trabalho apresentou um comportamento linear (Newtoniano).

Figura 25 – Detalhamento da figura 25: comparação da relação entre a viscosidade relativa e taxa de deformação com os dados de Manica (2009) para amostras com 100%_caulim e Cv de 5, 7 e 10%



(fonte: elaborada pela autora)

Na figura 26, pode-se comparar os resultados de Coussot (1995, p. 3972-3973), que igualmente trabalhou com uma mistura de água e caulim, com os obtidos para este trabalho. Foi possível verificar uma coerência na tendência de comportamento dos fluidos apesar das diferenças de mineralogia e faixa granulométrica utilizada pelos autores (tabela 6).

Figura 26 – Comparação dos resultados de caracterização reológica com as medidas de Coussot (1995) para a argila St-Bernard

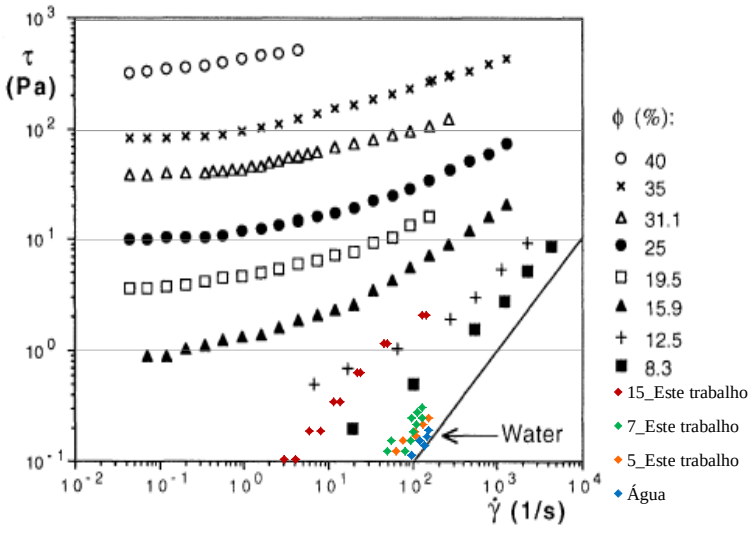


Tabela 6 – Comparação das diferentes composições de sedimento das misturas, faixa granulométrica, e método de medição com os dados de Coussot (1995)

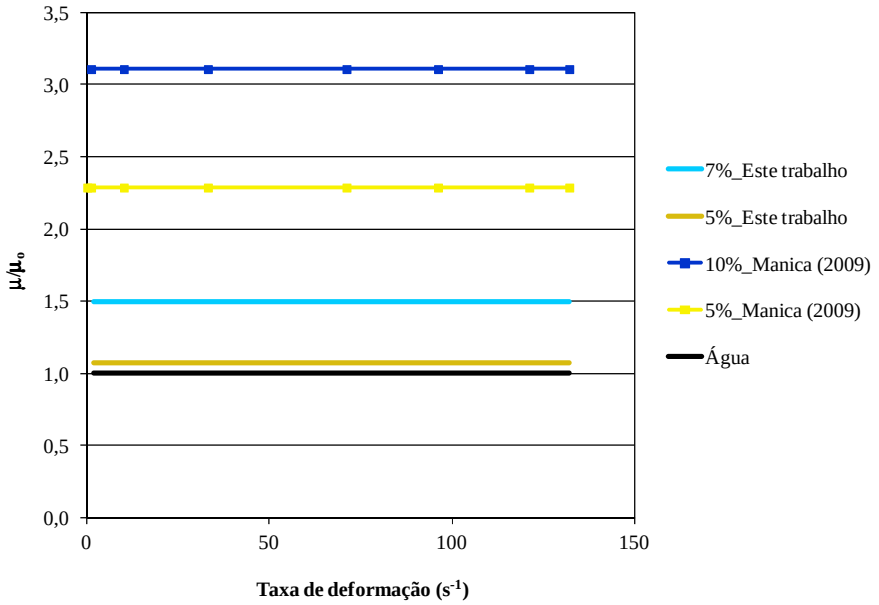
Sedimento	Tamanho médio e máximo dos grãos (micra)	Mineralogia	Equipamento de medição
Argila St-Bernard (proveniente de um depósito de fluxos de detritos)	8 - 40	Clorita/ilita	Reômetro capilar (Cv 8,13 e 12,5%); Reômetro rotacioal - prato paralelo (demais Cv)
Argila - este trabalho	13,8 - 20	Caulim	Reômetro rotacional - prato paralelo

(fonte: elaborada pela autora)

O comportamento de curva similar, observado ao comparar os resultados deste trabalho com os de Manica (2009) e Coussot (1995), mostra que apesar das diferenças físicas e de geometrias de medição utilizadas, o tipo de sedimento (argila) exerceu maior influência no comportamento reológico das misturas.

Observa-se na figura 27 (amostras de Manica com 50%_caulim_50%_esfera de vidro e deste trabalho com 50%_caulim_50%_carvão) que os resultados de Manica (2009) diferem dos encontrados neste trabalho. Nota-se que os valores da viscosidade são maiores e que o material inerte exerce influencia significativa no comportamento reológico. Deve-se levar em conta que o material inerte (esfera de vidro) utilizado pelo autor possui características físicas diferentes das do carvão utilizadas (tabela 7), o que justifica as diferenças de valores.

Figura 27 – Comparação da relação entre a viscosidade relativa e taxa de deformação com os dados de Manica (2009) (amostras com 50%_caulim_50%_esfera de vidro) e deste trabalho (amostras com 50%_caulim_50%_carvão)



(fonte: elaborada pela autora)

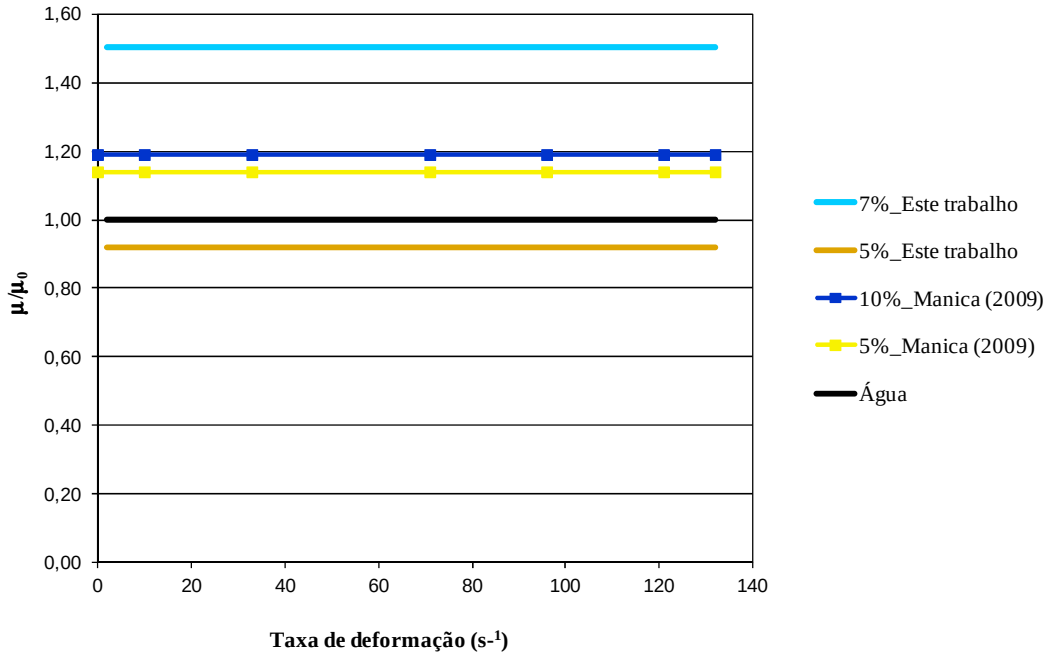
Tabela 7 – Comparação dos diferentes tipos de materiais das misturas, tamanho médio dos grãos, massa específica e forma dos grãos com os dados de Manica (2009)

Material	Tamanho médio do grão (micra)	Forma dos grãos	Massa específica (kg/m^3)
Caulim_Manica (2009)	9	Lamelar	2600
Caulim_este trabalho	13,8		2600
Esfera de vidro - Manica (2009)	42	Arredondada	2600
Carvão - este trabalho	101	Semiangular e Semiarredondada	1190

(fonte: elaborada pela autora)

Com relação aos resultados das amostras de Manica (2009) com 0%_caulim_100%_esferas de vidro e deste trabalho com 0%_caulim_100%_carvão é possível verificar claramente que há diferenças de comportamento dos fluidos que contém esfera de vidro e dos que contém carvão. É o que demonstra a figura 28.

Figura 28 – Comparação da relação entre a viscosidade relativa e taxa de deformação com os dados de Manica (2009) (amostras com 0%_caulim_100%_esferas de vidro) e deste trabalho (amostras com 0%_caulim_100%_carvão)



(fonte: elaborada pela autora)

As diferenças físicas desses elementos (carvão e esfera de vidro) e as possíveis formas de interação entre as partículas influenciaram de modo distinto as resistências dos fluidos. O gráfico também mostra que o resultado da amostra com concentração de 5% e composição 0%_caulim_100%_carvão ficou abaixo da viscosidade relativa da água, o que seria inverossímil, indicando que o ensaio deve ser repetido.

5.4 CÁLCULO ANALÍTICO DA VISCOSIDADE

A prática corrente para estimar a viscosidade é calculá-la por meio de leis (fórmula 8) que consideram a variabilidade da concentração volumétrica das misturas (COUSSOT, 1997, p. 47). Na tabela 8 e 9, encontram-se os resultados dos valores de viscosidade dinâmica obtidos experimentalmente e analiticamente.

Para 2% < Cv < 10% (BATCHELOR; GREEN, 1972) a fórmula é:

$$\mu = \mu_0 \left(1 + 2{,}5\phi + 7{,}6\phi^2\right) \qquad \text{(fórmula 8)}$$

Tabela 8 – Valores da viscosidade dinâmica e analítica para Cv 5% da mistura de 100%_caulim_0%_carvão

Composição da Mistura		Cv	Viscosidade Dinâmica - μ (Pa.s)	
Caulim	Carvão		Experimental	Analítico
100%	0%	5%	0,00160	0,00126
Água			0,00110	

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 9 – Valores da viscosidade dinâmica e analítica para Cv 7% da mistura de 100%_caulim e 100%_carvão

Composição da Mistura		Cv	Viscosidade Dinâmica - μ (Pa.s)	
Caulim	Carvão		Experimental	Analítico
100%	0%	7%	0,00212	0,00133
0%	100%		0,00170	
Água			0,00110	

(fonte: elaborada pela autora)

Observa-se que os valores de viscosidade dinâmica obtidos experimentalmente foram maiores que os valores encontrados analiticamente e que o valor da viscosidade experimental para a concentração de 5% se aproximou mais do valor obtido analiticamente. Ao comparamos na tabela 9 os valores das duas misturas com a mesma concentração, nota-se que o valor de viscosidade calculado para a amostra que contém apenas carvão (0,00133 Pa.s) aproxima-se mais do valor encontrado experimentalmente (0,0017 Pa.s) em comparação com o valor obtido para a suspensão com caulim (0,00212 Pa.s). Deve-se levar em conta que as fórmulas propostas foram idealizadas para sedimentos de forma esférica (COUSSOT, 1997, p. 47). A proximidade dos valores referidos pode ser atribuída à forma do carvão (semiangular e semiarredondada), em contrapartida à forma achatada do caulim.

6 CONCLUSÕES

A prática de laboratório possibilitou a definição de quatro parâmetros que permitiram obter os valores de viscosidade (tipo de *spindle*, tempo de ensaio, tipo de ensaio e a faixa de variação da tensão) que tornou possível o estabelecimento de uma amostra homogênea. A fim de obter um esclarecimento de quão significativas são as diferenças de comportamento reológico decorrentes do tipo de condição de contorno imposta, sugere-se ensaiar uma mesma mistura em outras geometrias de medição.

Os resultados experimentais da caracterização reológica ajustaram-se bem aos modelos de Newton e Hershel-Bulkley. Com relação à amostra que continha apenas caulim, o aumento da concentração volumétrica foi o que determinou a mudança de comportamento e a transição entre o modelo Newtoniano e o modelo de Hershel-Bulkley que se encontra dentro da faixa de valores de concentração situada entre 7% e 15%.

Foi possível verificar para o grupo de concentrações de 5% e 7% que as características físicas dos sedimentos influenciaram no valor da viscosidade. A presença da argila ou do carvão em maior quantidade na mistura mostra ser um dos fatores para a modificação do seu comportamento reológico, demonstrando a existência de uma faixa de valores em que determinado material exerce maior influencia na resistência ao escoamento. A fim de observar a influencia do carvão no comportamento reológico, sugere-se detalhar as faixas de composição das misturas abaixo de 50%_caulim_50%_carvão.

A comparação dos resultados experimentais com o resultado analítico demonstrou que a fórmula empregada na literatura, a qual considera apenas a variação da concentração volumétrica para obter o valor da viscosidade e não as características físicas do sedimento, deve ser usada com cuidado. Considerar o uso de fórmulas que abranjam parâmetros como a concentração, a forma e o tamanho das partículas podem ser mais úteis para a comparação dos resultados.

Com a caracterização reológica das misturas estudadas, observou-se que a quantidade de material e as características físicas do sedimento influenciam o comportamento reológico das misturas que vão influir diretamente nos processos hidrodinâmicos da corrente de turbidez bem como nos mecanismos de transporte e de deposição dos sedimentos.

REFERÊNCIAS

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.

BOFFO, C. H. **Caracterização física de correntes de densidade em ambientes salinos sob diferentes contrastes de densidades**. 2010. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1973.

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. Structural similarity and transition from newtonian to non-newtonian behavior for clay-water suspensions. **Physical Rewiew Letters**, v. 74, n. 20, p. 3971 – 3974, 1995.

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

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

DORAISWAMY, D. The origins of rheology: a short historical excursion. **Rheology Bulletin**, [S. l.], v. 71, n. 1, p. 1-9, Jan. 2002.

DÜCKER, R. E. **Avaliação da capacidade portante de frações finas 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.

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

KIRYU, H. S. **Investigação reológica e análise mecânica de compósitos não-newtonianos**. 2006. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteria.

MANICA, R. **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.

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

PUHL, E. **Parametrização de ensaios de simulação física de correntes de densidade**. 2007. 104 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.

SANTOS, F. L. **Estudo teórico-experimental em via de determinação de lei de atrito em escoamento de fluidos hiperconcentrados**. 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Ênfase em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria**: fundamentos teóricos e práticos. São Paulo: Artliber, 2006.

TARQUI, J. L. Z. **Padrões de escoamento de fluido de mistura água-sedimento em lâmina de pouca espessura**. 2001. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WANG, Z.; LARSEN, P.; XIANG, W. Rheological properties of sediment suspensions and their implications. **Journal of Hydraulic Research**, v. 32, n. 4, p. 495-516, 1994.