

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JOÃO BATISTA PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE APARATO AUTOMATIZADO DE *SLUMP TEST*:
FERRAMENTA DE CONTROLE DE QUALIDADE E DE CARACTERIZAÇÃO
REOLÓGICA DE MATERIAIS**

Ilha Solteira
2018

JOÃO BATISTA PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE APARATO AUTOMATIZADO DE *SLUMP TEST*:
FERRAMENTA DE CONTROLE DE QUALIDADE E DE CARACTERIZAÇÃO
REOLÓGICA DE MATERIAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Especialidade: Materiais e Processos de Fabricação.

Prof. Dr. Ruís Camargo Tokimatsu
Orientador

Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel
Coorientador

Ilha Solteira
2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P436d Pereira, João Batista.
Desenvolvimento de aparato automatizado de *Slump test*: ferramenta de controle de qualidade e de caracterização reológica de materiais / João Batista Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
125 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2018

Orientador: Ruís Camargo Tokimatsu
Coorientador: Geraldo de Freitas Maciel
Inclui bibliografia

1. *Slump test*. 2. Aparato automatizado. 3. Reologia. 4. Tensão limite de escoamento. 5. Viscosidade aparente.


Raiane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DE APARATO AUTOMATIZADO DE SLUMP TEST:
FERRAMENTA DE CONTROLE DE QUALIDADE E CARACTERIZAÇÃO
REOLÓGICA DE MATERIAIS

AUTOR: JOÃO BATISTA PEREIRA
ORIENTADOR: RUIS CAMARGO TOKIMATSU
COORIENTADOR: GERALDO DE FREITAS MACIEL

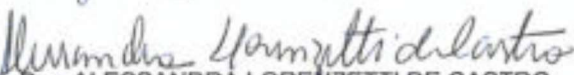
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA
MECÂNICA, área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. GERALDO DE FREITAS MACIEL
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOÃO ANTONIO PEREIRA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dra. ALESSANDRA LORENZETTI DE CASTRO
Departamento de Engenharia de Estruturas / Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Ilha Solteira, 31 de julho de 2018

Aos meus pais, que acreditam e incentivam meu trabalho;

À minha esposa que me fortalece.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por me guiar continuamente pelos caminhos da vida, proporcionando-me força, sabedoria, dedicação, paciência e amor.

Aos meus pais, pelo carinho, compreensão e fortaleza em todos os momentos de minha vida, especialmente durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha esposa pela paciência, palavras de sabedoria, pelo amor e carinho. Agradeço sua presença diária no decorrer de meu mestrado.

Aos colegas do grupo de pesquisa RMVP, André, Caio, César, Evandro, Fabiana, Matheus, Renan, Vicente e Yuri, pelo apoio no desenvolvimento deste mestrado e discussões durante os cafezinhos.

Aos amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao professor Geraldo de Freitas Maciel por todo conhecimento a mim transmitido, paciência e dedicação à minha formação. Agradeço ainda pelos momentos de discussões sobre ciência e pela confiança depositada em mim.

À professora Mônica Pinto Barbosa pelo auxílio no desenvolvimento deste projeto e por ter despertado em mim o desejo pelo trabalho científico.

Ao Prof. Dr. Ruís Camargo Tokimatsu pela presença, apoio e compreensão no desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof^a. Dr^a. Alessandra Lorenzetti de Castro e Prof. Dr. João Antônio Pereira, pelo aceite e disponibilidade em contribuírem com o trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica por ter me proporcionado a realização do mestrado e uma formação de qualidade.

Aos funcionários da UNESP de Ilha Solteira pela prontidão em me auxiliar. Especialmente, aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil e ao técnico Gilberto, que me apoiaram ao longo deste trabalho. Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil e da seção de Pós-Graduação pela atenção e apoio.

À FAPESP pelo Auxílio Regular à Pesquisa 2015/25518-8 e ao CNPq pelo financiamento de bolsa de mestrado.

Por fim, agradeço a todos.

“A vida não tem sentido a priori [...] Cabe a você dar-lhe sentido, e o valor nada é além do sentido que você escolhe”.

Jean-Paul Sartre (1905-1980)

RESUMO

O ensaio de abatimento de tronco de cone, desenvolvido inicialmente como ferramenta de controle de qualidade para avaliar a consistência de materiais cimentícios e com grande aplicação no setor da construção civil, tem sido cada vez mais empregado para análise de materiais de diferentes setores, seja da indústria do petróleo, da mineração e mesmo de alimentos. O interesse de diferentes setores industriais pela medida do abatimento deve-se a esta possibilitar uma ferramenta de controle de qualidade de materiais e ainda fornecer um mecanismo simples e fácil para a determinação de um importante parâmetro reológico, a tensão limite de escoamento. Nesse contexto, esta dissertação de mestrado apresenta o desenvolvimento de um aparato experimental capaz de realizar, de forma automatizada, o ensaio de abatimento de tronco de cone (comumente conhecido por *slump test*), desde o levantamento do cone de Abrams até a medição do abatimento. A partir do equipamento desenvolvido, três abordagens são realizadas e discutidas ao longo desta dissertação, tendo como materiais avaliados os géis de carbopol (fluido teste reologicamente representativo de lamas), lamas, argamassas e concretos. A primeira abordagem diz respeito a funcionalidade e operacionalidade do aparato automatizado de *slump test*. A segunda abordagem apresenta modelos empíricos de determinação da tensão limite de escoamento e viscosidade aparente, a partir da medida mais rigorosa de abatimento e outras informações fornecidas pelo aparato automatizado. Por fim, a terceira abordagem apresenta a simulação numérica e a validação do *slump test* por meio do software FLUENT, considerando a propriedade não-Newtoniana (fluido de Herschel-Bulkley) dos materiais ensaiados, e a tentativa de validação de tal modelo. De forma geral, o aparato automatizado desenvolvido mostrou-se capaz de realizar o *slump test*, fornecendo medidas com maior rigor e menor influência do operador no ensaio; as medidas obtidas a partir do equipamento permitiram caracterizar, reologicamente, os materiais avaliados; e o modelo numérico desenvolvido, ainda com implementações a serem realizadas, apresentou-se capaz de fornecer a medida de abatimento.

Palavras-chave: *Slump test*. Aparato automatizado. Reologia. Tensão limite de escoamento. Viscosidade aparente.

ABSTRACT

The slump test was, initially, developed as a quality control tool for evaluating the consistency of cement-based materials, with many applications in civil engineering, it has been used for the analysis of materials in different sections of petrol industries, mining, and even food industries. The interest of these different industrial sections in the slump is due to its possible role as quality control tool of materials, providing an easy and simple mechanism for the determination of an important rheological parameter: the yield stress. In this context, this dissertation presents the development of an experimental apparatus capable of obtaining, in such automated way, the slump test, since the lifting of the Abrams cone to the obtaining of the slump. From the apparatus, three approaches are presented and discussed in this text, showing the results for the evaluation of materials such as carbopol gel (a rheological representative fluid of mud), mud, concrete and mortar. The first approach deals with the functionality of the automated apparatus for slump test. The second approach presents empiric models for the determination of yield stress and apparent viscosity, from the slump and further information obtained by the automated apparatus. The third and last approach presents the numerical simulation and validation of the slump test by the use of FLUENT software, considering the Non-Newtonian property (Herschel-Bulkley's fluid) of the tested materials, and the trial of the model's validation. In general, the automated apparatus has shown capable of realizing the slump test, providing measures more robust and less influenced by the operator; the obtained measures by the apparatus have permitted the rheological characterization of the evaluated materials; and the developed numerical model, though with some implementation to be made, has presented itself capable of providing the measure of the slump.

Keywords: Slump test. Automated apparatus. Rheology. Yield Stress. Apparent Viscosity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Cisalhamento simples de um escoamento viscoso em regime laminar27
Figura 2	Curvas de fluxos de fluido Newtoniano e não-Newtoniano obtidas a partir do reômetro Brookfield R/S, para diversos materiais testados34
Figura 3	Ilustração do tronco de cone e haste de compactação segundo a NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998)37
Figura 4	Medição do abatimento do concreto38
Figura 5	Equipamentos de reometria: (a) reômetro rotacional e (b) cilindros coaxiais e palhetas do sistema Vane40
Figura 6	Representação esquemática do aparato automatizado de <i>slump test</i>48
Figura 7	Sistema guia: configuração definida para evitar movimentação do cone de Abrams49
Figura 8	Vista lateral do aparato automatizado de <i>slump test</i>50
Figura 9	Sensor de medição a laser posicionado no aparato automatizado de <i>slump test</i> e disposição do cone de Abrams na mesa do aparato.....51
Figura 10	Curva de calibração obtida para o sensor de medição a laser utilizado...52
Figura 11	Sistema de aquisição de dados53
Figura 12	Geometria e condições de contorno para a simulação numérica do <i>slump test</i>63
Figura 13	Esquema para definição da taxa de deformação envolvida no <i>slump test</i>66
Figura 14	Configuração final do aparato automatizado de <i>slump test</i> desenvolvido.....68
Figura 15	Comportamento da função sigmoidal de Boltzmann como ajuste dos dados de descida do material durante o <i>slump test</i>69
Figura 16	Definição da medida de abatimento e do tempo de abatimento a partir dos dados fornecidos pelo aparato automatizado desenvolvido.....70
Figura 17	Comportamento do gel de carbopol: (a) NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998) e (b) aparato automatizado.....71

Figura 18	Comportamento do concreto no tempo 10 min após: (a), (b) e (c) ensaio NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998) segundo diferentes operadores e (d) aparato automatizado de <i>slump test</i>	73
Figura 19	Curvas de fluxo para as diferentes concentrações de géis de carbopol analisadas	74
Figura 20	Curvas de fluxo para as diferentes concentrações de lamas analisadas	74
Figura 21	Curvas de fluxo para a argamassa ARG 1	75
Figura 22	Curvas de fluxo para a argamassa ARG 2	75
Figura 23	Curvas de fluxo para a argamassa ARG 3	76
Figura 24	Curvas de fluxo para a argamassa ARG 4	76
Figura 25	Relação entre os adimensionais característicos para os dados dos géis de carbopol.....	80
Figura 26	Relação entre os adimensionais característicos para os dados das lamas	80
Figura 27	Relação entre os adimensionais característicos para os dados das argamassas.....	81
Figura 28	Relação entre os adimensionais definidos para avaliação da viscosidade aparente das argamassas analisadas.....	83
Figura 29	Comportamento da viscosidade aparente das argamassas para diferentes tempos de abatimento e medidas de abatimento	84
Figura 30	Relação entre abatimento, viscosidade aparente e tempo de abatimento.....	85
Figura 31	Carbopol $C_m = 0,20\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico.....	86
Figura 32	Carbopol $C_m = 0,22\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico.....	86
Figura 33	Carbopol $C_m = 0,25\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico.....	87
Figura 34	Lama $C_v = 30,0\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico.....	87
Figura 35	Lama $C_v = 31,0\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico.....	87

Figura 36	Lama $C_v = 32,5\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico.....	88
Figura 37	Comparação entre espalhamentos experimentais e numéricos	88
Figura A.1	Geometria cilíndrica do cone de Abrams.....	101
Figura A.2	Adimensionais de abatimento e tensão limite de escoamento e seus regimes de escoamento para géis de carbopol	104
Figura A.3	Adimensionais de abatimento e tensão limite de escoamento e seus regimes de escoamento para lamas.....	104
Figura A.4	Adimensionais de abatimento e tensão limite de escoamento e seus regimes de escoamento para argamassas.....	105
Figura C.1	Curvas características de descida do material durante o <i>slump test</i> de géis de carbopol	114
Figura C.2	Curvas características de descida do material durante o <i>slump test</i> de lamas	114
Figura C.3	Curvas características de descida do material durante o <i>slump test</i> da argamassa ARG 1	115
Figura C.4	Curvas características de descida do material durante o <i>slump test</i> da argamassa ARG 2	115
Figura C.5	Curvas características de descida do material durante o <i>slump test</i> da argamassa ARG 3	116
Figura C.6	Curvas características de descida do material durante o <i>slump test</i> da argamassa ARG 4	116
Figura C.7	Curvas características de descida do material durante o <i>slump test</i> de concreto.....	117
Figura D.1	Relação entre adimensionais criados para complementação da avaliação de viscosidade de argamassas	119
Figura D.2	Comportamento da viscosidade aparente das argamassas para diferentes medidas de abatimento, espalhamento e tempo de abatimento.....	120
Figura E.1	Avaliação da correlação definida para obtenção da tensão limite de escoamento de géis de carbopol.....	121
Figura E.2	Avaliação da correlação definida para obtenção da tensão limite de escoamento de lamas.....	122

Figura E.3	Avaliação da correlação definida para obtenção da tensão limite de escoamento de argamassas.....	122
------------	--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características do sensor de mediação a laser utilizado.....	51
Tabela 2	Características do polímero Carbopol 996	54
Tabela 3	Características da argila caulínica São Simão.....	54
Tabela 4	Composição das argamassas produzidas	57
Tabela 5	Composição do concreto produzido	58
Tabela 6	Esquemas numéricos	63
Tabela 7	Dados médios e desvios padrão de abatimentos obtidos segundo aparato automatizado e NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998)	71
Tabela 8	Medidas de abatimento de concreto convencional obtidas pelo aparato automatizado e segundo o ensaio de abatimento de tronco de cone por meio de diferentes operadores	72
Tabela 9	Dados médios e desvios padrão de abatimentos e parâmetros reológicos dos géis de carbopol produzidos.....	77
Tabela 10	Dados médios e desvios padrão de abatimentos e parâmetros reológicos das lamas produzidas.....	77
Tabela 11	Dados médios e desvios padrão de abatimentos e parâmetros reológicos das argamassas produzidas para o tempo de 10 minutos	78
Tabela 12	Dados médios e desvios padrão de abatimentos e parâmetros reológicos das argamassas produzidas para o tempo de 30 minutos	78
Tabela 13	Dados médios e desvios padrão de abatimentos e parâmetros reológicos das argamassas produzidas para o tempo de 50 minutos	79
Tabela 14	Parâmetros das funções de correlação de abatimento e tensão limite de escoamento obtidas para géis de carbopol, lamas e argamassas	81
Tabela 15	Parâmetros da função de correlação de abatimento e viscosidade aparente das argamassas	84
Tabela B.1	Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,15 \%$	106
Tabela B.2	Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,17 \%$	106

Tabela B.3	Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,20\%$	107
Tabela B.4	Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,22\%$	107
Tabela B.5	Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,25\%$	108
Tabela B.6	Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,27\%$	108
Tabela B.7	Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,32\%$	109
Tabela B.8	Caracterização reológica, física e medida de abatimento de lama $C_v = 27,5\%$	109
Tabela B.9	Caracterização reológica, física e medida de abatimento de lama $C_v = 30,0\%$	110
Tabela B.10	Caracterização reológica, física e medida de abatimento de lama $C_v = 31,0\%$	110
Tabela B.11	Caracterização reológica, física e medida de abatimento de lama $C_v = 32,5\%$	111
Tabela B.12	Caracterização reológica, física e medida de abatimento de lama $C_v = 34,0\%$	111
Tabela B.13	Caracterização reológica, física e medida de abatimento da argamassa ARG 1	112
Tabela B.14	Caracterização reológica, física e medida de abatimento da argamassa ARG 2	112
Tabela B.15	Caracterização reológica, física e medida de abatimento da argamassa ARG 3	113
Tabela B.16	Caracterização reológica, física e medida de abatimento da argamassa ARG 4	113
Tabela D.1	Parâmetros da função de correlação para obtenção da viscosidade aparente de argamassas a partir das medidas de abatimento, espalhamento e tempo de abatimento.....	119

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALCAN	<i>Aluminium Company of Canada</i>
ARG	Argamassa
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i> Ensaio de Materiais
CAA	Concreto autoadensável
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
EMFAL	Empresa Fornecedora de Álcool
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
RMVP	Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplasticos
R/S	<i>Rate / Stress</i>
S.A.	Sociedade Anônima
SP	São Paulo
UHPC	<i>Ultra High Performance Concrete</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista
VOF	<i>Volume of Fluid</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Alfabéticos

p	campo de pressão (Pa)
U	campo de velocidade do escoamento
u	velocidade de escoamento na direção de x
x, y, z	sistema de coordenadas no plano cartesiano
D_{ij}	tensor taxa de deformação (1/s)
D_{II}	segundo invariante do tensor taxa de deformação
F	função contínua positiva
K_n	índice de consistência (Pa.s ⁿ)
n	índice de escoamento
T_e	temperatura do fluido (°C)
V	tensão (V)
d	distância (mm)
C_m	concentração em massa (%)
C_V	concentração em volume (%)
C	número de Courant
Δt	passo de tempo
Δx	tamanho da malha
S	medida do abatimento (mm)
H	altura do cone de Abrams (mm)
g	vetor aceleração da gravidade (m/s ²)
$h(r)$	altura da amostra deformada (mm)
$V(r)$	velocidade radial (mm/s)
r, θ, z	sistema de coordenadas cilíndricas
V_θ	velocidade azimutal
T	tempo de abatimento (s)
t	tempo (s)
h	altura da amostra no ponto central da amostra deformada (m)
R	raio da amostra deformada em $h = 0$ (m)
V_0	volume do cone de Abrams (m ³)

R_0	raio da amostra deformada na altura igual a h (m)
D	medida de espalhamento (mm)

Símbolos Gregos

σ	tensor de Cauchy (N/m ²)
δ	Delta de Kronecker
τ	parcela viscosa do tensor de tensões (N/m ²)
$\dot{\gamma}$	taxa de deformação (1/s)
∇	operador vetorial nabla
μ	viscosidade dinâmica (Pa.s)
μ_{ap}	viscosidade aparente (Pa.s)
μ_{dif}	viscosidade diferencial (Pa.s)
τ_0	tensão limite de escoamento (Pa)
μ_β	viscosidade do modelo reológico de Bingham (Pa.s)
η	viscosidade aparente (Pa.s)
$\dot{\gamma}_c$	taxa de deformação crítica (1/s)
ρ	massa específica (kg/m ³)
$\dot{\gamma}_{m\u00e9dio}$	taxa de cisalhamento média (1/s)
α	adimensional relacionado à medida de abatimento (S/H)
β	adimensional relacionado à medida de tensão limite de escoamento ($\tau_0/\rho gH$)
ω	adimensional relacionado à medida de viscosidade ($\mu_{ap}/\rho gHT$)
ξ	adimensional relacionado à nova análise da medida de viscosidade ($\mu_{ap}/\rho gDT$)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	ABRANGÊNCIA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO.....	20
1.2	OBJETIVOS	22
1.3	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	22
2	REOLOGIA	24
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	24
2.2	ASPECTOS CONCEITUAIS	25
2.2.1	Tensão de cisalhamento	26
2.2.2	Taxa de deformação	27
2.2.3	Viscosidade	28
2.3	MODELOS REOLÓGICOS	29
2.3.1	Fluidos Newtonianos	29
2.3.2	Fluidos não-Newtonianos	30
3	SLUMP TEST	35
3.1	ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE: CONTROLE DE QUALIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	35
3.2	SLUMP TEST: MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS REOLÓGICOS	39
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	46
4.1	PROPOSTA EXPERIMENTAL: APARATO AUTOMATIZADO DE SLUMP TEST.....	46
4.1.1	Sistema de levantamento	47
4.1.2	Sistema de medição	50
4.1.3	Sistema de aquisição de dados	52
4.2	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.....	53
4.2.1	Polímero carbopol	54
4.2.2	Argila caulínica	54
4.2.3	Cimento	54
4.2.4	Agregado miúdo	55
4.2.5	Agregado graúdo	55
4.2.6	Água de Amassamento	55
4.3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	55

4.3.1	Gel de carbopol	56
4.3.2	Lama	56
4.3.3	Argamassa	57
4.3.4	Concreto	57
4.3.5	Caracterização reológica	58
4.3.6	Medida de abatimento	59
4.4	PROPOSTA DE MODELAGEM: SIMULAÇÃO DO SLUMP TEST	61
4.5	ANÁLISE DIMENSIONAL A SERVIÇO DA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS REOLÓGICOS A PARTIR DA MEDIDA DE ABATIMENTO.....	64
4.5.1	Análise dimensional: tensão limite de escoamento	65
4.5.2	Análise dimensional: viscosidade aparente	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
5.1	APARATO AUTOMATIZADO DE SLUMP TEST	68
5.1.1	Medidas fornecidas pelo aparato automatizado de slump test	69
5.1.2	Comparação de abatimentos obtidos a partir do aparato automatizado de slump test e slump test manual	70
5.1.3	Avaliação do operador na realização do ensaio de abatimento de tronco de cone	71
5.2	COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MEDIDAS DE ABATIMENTO DOS MATERIAIS AVALIADOS.....	73
5.3	DETERMINAÇÃO DA TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO A PARTIR DA MEDIDA DE ABATIMENTO AUTOMATIZADA	79
5.4	DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE A PARTIR DA MEDIDA DE ABATIMENTO AUTOMATIZADA: ESTUDO DE CASO DA ARGAMASSA .	82
5.5	CONFRONTO EXPERIMENTAL X SIMULAÇÃO NUMÉRICA	86
6	CONCLUSÕES	90
6.1	APARATO AUTOMATIZADO DE SLUMP TEST	90
6.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS REOLÓGICOS A PARTIR DAS MEDIDAS OBTIDAS NO APARATO AUTOMATIZADO	91
6.3	MODELAGEM NUMÉRICA.....	91
6.4	PERSPECTIVAS.....	92
6.4.1	Melhorias no sistema de medição	92
6.4.2	Simulação numérica	93
6.4.3	Estudo sobre fatores de influência da medida de abatimento	93

6.4.4	Análises complementares	93
6.4.5	Complementação da avaliação de materiais cimentícios.....	94
	REFERÊNCIAS.....	95
	APÊNDICE A - PROPOSTA DE MODELAGEM E LEITURAS INTERPRETATIVAS À LUZ DOS EXPERIMENTOS	101
	APÊNDICE B - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E MEDIDAS DE ABATIMENTO	106
	APÊNDICE C - CURVAS DE DESCIDA DO MATERIAL DURANTE O SLUMP TEST.....	114
	APÊNDICE D - COMPLEMENTAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE DE ARGAMASSAS A PARTIR DO SLUMP TEST	118
	APÊNDICE E - VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE CORRELAÇÃO DE TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO	121

1 INTRODUÇÃO

1.1 ABRANGÊNCIA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Muitos dos produtos utilizados na vida diária exibem comportamento de sólidos ou líquidos, de acordo com as tensões impostas (DINKGREVE et al., 2016). Nesse sentido, diversos materiais utilizados na indústria (seja da construção civil, da mineração, do petróleo, dos alimentos, da beleza, etc) apresentam o comportamento típico de um fluido que começa a escoar quando aplicada uma mínima tensão, a tensão limite de escoamento (STARON, 2013; ROUSSEL, 2006).

Materiais como cremes cosméticos e pastas de dente, espumas, margarinas, géis poliméricos como o Carbopol, rejeitos da mineração, bem como materiais de base mineralógica e cimentícia são exemplos de produtos que apresentam a tensão limite de escoamento (DINKGREVE et al., 2016; GUTIERREZ; MIZANI; SIMMS, 2016; CHOI et al., 2015; PAWLIK, 2015; DE LARRARD et al., 1998).

Essa propriedade do material pode ser medida por diferentes técnicas (COUSSOT, 2014; ROUSSEL, 2006), destacando-se o *slump test* como uma técnica robusta, barata e rápida (GARCIA-BERNET et al., 2011; PASHIAS et al., 1996).

Inicialmente desenvolvido como uma ferramenta de controle de qualidade do concreto no estado fresco, o *slump test* ⁽¹⁾, notoriamente o teste mais realizado nos canteiros de obra como decisivo a aceitabilidade e garantia de trabalhabilidade ⁽²⁾ do material, tornou-se um mecanismo simples e fácil de caracterização reológica dos materiais.

O modelo de previsão da tensão limite de escoamento, a partir da medida de abatimento do material, foi inicialmente idealizado por Murata (1984), a partir do molde de geometria cônica e análise de materiais cimentícios (concretos e argamassas), sendo, na sequência, corrigido e consolidado por Christensen (1991), também considerando geometria cônica. Pashias et al. (1996) adaptaram a teoria de previsão de tensão limite de escoamento para a geometria cilíndrica e, a partir da medida de abatimento de diferentes tipos de suspensões minerais, obteve boa concordância entre o modelo de previsão e as tensões limites de escoamento medidas.

⁽¹⁾ Ensaio de abatimento de tronco de cone: ensaio normatizado pela NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998).

⁽²⁾ O *slump test* é uma das ferramentas de avaliação da trabalhabilidade de materiais cimentícios, sendo seu uso relacionado à avaliação de consistência.

Diversos outros estudos vêm demonstrando a eficácia do uso da medida de abatimento na previsão de tensões limites de escoamento, como o trabalho de Baudez, Chabot e Coussot (2002) que fez uso dessa ferramenta tanto para soluções de base mineralógica quanto para materiais de base polimérica (géis de carbopol). Na mesma direção, o trabalho de Chidiac et al. (2000) desenvolveu um mecanismo de controle de qualidade do concreto fresco baseado no *slump test*.

No mesmo contexto, os trabalhos de Roussel e Coussot (2005) e, mais recentemente o de Pierre et al. (2013), trouxeram soluções analíticas para o cálculo da tensão limite de escoamento sob diferentes condições de escoamento.

Modelos empíricos também foram desenvolvidos a fim de fazer do *slump test* um mecanismo de caracterização reológica, destacando-se o *slump test* modificado, idealizado por Ferraris e De Larrard (1998), o qual avalia tanto a tensão limite de escoamento quanto a viscosidade plástica de materiais cimentícios.

Também tem sido relatado modelagens numéricas que visam avaliar o comportamento de escoamento de fluidos a partir da medida de abatimento, bem como verificar a validade e acurácia de expressões analíticas/empíricas desenvolvidas para medir os parâmetros reológicos (CHOI et al., 2015; GAO; FOURIE, 2015; BOUVET et al., 2010).

Além do parâmetro reológico tensão limite de escoamento, a viscosidade constitui-se como um importante parâmetro na análise de escoamento de materiais. Mesmo sabendo que a medida de abatimento tem sido correlacionada à tensão limite de escoamento, e que apenas esse parâmetro não é suficiente para a caracterização de escoamento dos materiais (CHIDIAC; MAHMOODZADEH, 2009), estudos têm sido realizados com a finalidade de correlacionar a medida de abatimento também ao parâmetro reológico viscosidade (DE CAMPOS; GALINDO, 2016; BOUZIANI; BENMOUNAH, 2013; FERRARIS; DE LARRARD, 1998).

Nesse sentido, este trabalho busca apresentar uma ferramenta de controle de qualidade de materiais cimentícios e de caracterização reológica de outros materiais (de base polimérica e mineralógica), baseada no desenvolvimento de um aparato de *slump test* automatizado.

Assim, o direcionamento dado a este trabalho vai ao encontro das necessidades do grupo de pesquisa Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplasticos (RMVP) no que diz respeito à implementação de procedimentos e técnicas para determinação rigorosa dos parâmetros reológicos dos materiais nas duas diferentes

vertentes de pesquisa do grupo, a saber: a primeira relacionada ao estudo da reologia de materiais de base cimentícia, extremamente importante para a construção civil, sobretudo relacionada ao controle de qualidade de concretos (PEREIRA et al., 2016) e a segunda relacionada à temática de riscos e catástrofes, tendo como foco escoamentos lamosos com estudo conjunto entre abordagem analítica, experimental e numérica (MACIEL et al., 2017).

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de promover tanto o controle de qualidade de materiais cimentícios quanto a avaliação reológica de materiais.

Como objetivos específicos, este trabalho de mestrado almeja:

- Desenvolver um equipamento que seja capaz de realizar de forma automatizada o *slump test*;
- Correlacionar a medida de abatimento (*slump*) ao parâmetro tensão limite de escoamento e viscosidade aparente;
- Confrontar simulações numéricas do *slump test* com resultados experimentais obtidos a partir do aparato automatizado desenvolvido.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

A Dissertação de Mestrado aqui apresentada é composta por 6 (seis) Capítulos, conforme apresentados a seguir:

No Capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho, no qual são expostos os elementos de justificativa e motivação do estudo, além dos objetivos almejados.

O Capítulo 2 apresenta, de forma sucinta, as definições e aspectos conceituais, bem como importância e aplicações da Reologia.

O Capítulo 3 aborda o *slump test* e sua capacidade como instrumento de controle de qualidade de materiais cimentícios e como mecanismo de caracterização reológica. São apresentados os principais modelos analíticos, experimentais e numéricos desenvolvidos para obtenção dos parâmetros tensão limite de escoamento e viscosidade segundo o *slump test*.

No Capítulo 4, o programa experimental do trabalho desenvolvido é apresentado. Nesse capítulo é apresentado o aparato automatizado de *slump test* desenvolvido, descrevendo-o segundo todos os seus componentes. Também é exposta a caracterização física dos materiais analisados, bem como os procedimentos de produção dos géis de carbopol, lamas, argamassas e concreto. Além disso é apresentado o procedimento de obtenção das medidas reológicas e de abatimento, bem como as características do modelo numérico. E por fim, mostra-se o desenvolvimento dos adimensionais utilizados para a análise dos resultados.

No Capítulo 5 é apresentado o comportamento do aparato automatizado de *slump test* desenvolvido, avaliando-se as medidas fornecidas pelo aparato e sua capacidade em realizar o ensaio de abatimento de tronco de cone. Além disso, são reunidos todos os resultados obtidos, estabelecendo uma ampla discussão acerca dos mesmos.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões de aprimoramento e desenvolvimento de novas pesquisas relacionadas ao tema tratado.

As referências consultadas para a elaboração desta dissertação, além de apêndices com figuras, tabelas e dados de complementação da pesquisa, são expostas no fim do trabalho.

2 REOLOGIA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Estudos referentes à reologia precedem a invenção do termo, sendo Hooke e Newton, ainda no século XVII, os primeiros a estabelecerem uma relação entre tensões e deformações (TANNER, 2000). O termo reologia foi criado pelo professor E.C. Bingham, tendo como significado o estudo da deformação e do escoamento da matéria, e sua definição foi aceita em 1929 com a fundação da *American Society of Rheology* (BARNES; HUTTON; WALTERS, 1989).

A palavra reologia advém do grego *rheos* que significa “fluir”, sendo, portanto, tida como a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, avaliando as relações entre a tensão de cisalhamento aplicada, e a deformação do material em um determinado período de tempo (GLATTHOR; SCHWEIZER, 1994). De outra maneira, pode-se dizer que a reologia tem como função analisar as respostas de um material, quando este sofre a aplicação de uma tensão ou deformação.

A reologia apresenta um campo vasto de aplicação, podendo estudar o comportamento de materiais no estado sólido, líquido ou gasoso (CASTRO, 2007). Entretanto, a descrição do comportamento dos materiais sofreu grandes alterações ao longo dos anos até chegar aos modelos que conhecemos hoje. Segundo Doraiswamy (2002), em seu relato acerca da história da reologia, inicialmente, os materiais eram descritos segundo modelos ideais, sendo definidos como: sólidos rígidos (também chamados de corpos “Euclidianos”, por volta de 250 a.C.), sólidos elásticos (material com comportamento puramente elástico ou Hookeano, século XVII) e fluidos invíscidos (metade do século XVII). Posteriormente, novos modelos foram propostos, como o de fluidos Newtonianos, cujas leis de escoamento foram definidas a partir do século XIX. Apenas no final do século XIX surgiram os primeiros trabalhos acerca da viscoelasticidade linear, sendo acompanhados por estudos de fluidos Newtonianos generalizados no início do século XX. Surgiram também, no início do século XX, as teorias da viscoelasticidade não-linear juntamente com estudos sobre polímeros, suspensões, dispersões e efeito viscoso extensional, surgindo, de fato, em 1929, a reologia como uma nova área da ciência.

Sabe-se que o comportamento dos materiais ideais é simples e de fácil análise, entretanto, a maioria dos materiais de interesse tecnológico apresenta propriedades

reológicas intermediárias, entre os “sólidos ideais” e os “líquidos ideais”, e de maior complexidade (OLIVEIRA et al., 2000).

O comportamento reológico dos materiais é visto segundo a relação entre forças e deformações e, de forma geral, essa relação pode ser representada por uma formulação matemática chamada de equação de estado reológico ou equação constitutiva. Dessa forma, as propriedades reológicas são expressas a partir de um modelo matemático e os valores constantes incluídos no modelo representam as características do material (MALKIN; ISAYEV, 2012).

Os campos de aplicação da reologia são imensos (da hemoreologia, passando pela indústria farmacêutica, química etc, à indústria da construção civil) e diversos ramos não podem mais ser desenvolvidos sem a participação de estudos reológicos. Vale ressaltar que os polímeros e plásticos continuam a ser o principal objeto de estudos reológicos (MALKIN; ISAYEV, 2012), entretanto tem-se notado ultimamente o uso crescente da caracterização reológica voltada aos materiais cimentícios, sobretudo relacionada ao desenvolvimento de concretos autoadensáveis (CAA), bem como aos materiais lamosos provenientes da mineração, com o propósito de minimizar os impactos da atividade mineradora (LONG et al., 2017; BOGER, 2013).

2.2 ASPECTOS CONCEITUAIS

A correta compreensão da reologia dos materiais requer o conhecimento prévio acerca da relação entre duas grandezas: a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

Além disso, é necessário conhecer os parâmetros que irão compor a relação entre essas duas grandezas: a viscosidade (diferencial, aparente), que define a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação; a tensão limite de escoamento (tensão crítica), correspondente à tensão mínima necessária para que o fluido possa escoar; e o índice de escoamento, o qual indica a linearidade ou não-linearidade da relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação (FIOROT, 2012).

2.2.1 Tensão de cisalhamento

O escoamento do material requer que vários de seus elementos estejam sob a ação de forças. Na prática, as forças que atuam em um elemento fluido são divididas em duas classes. Na primeira classe encontram-se as forças de superfície, as quais são forças de curto alcance. A segunda classe, forças de corpo, são aquelas que atuam sob longo alcance como, por exemplo, força eletromagnética e gravitacional.

Considerando um elemento de superfície dS de uma fração de um fluido, as forças de superfície podem ser vistas segundo tensões atuantes, tanto tangenciais (de cisalhamento) quanto normais, podendo ser escrita conforme a Equação 1.

$$dF = \sigma \cdot ndS \quad (1)$$

sendo σ (ou σ_{ij} , em notação indicial) um tensor simétrico ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) cuja contração com o vetor unitário n representa as forças de superfície em contato com a superfície ortogonal em n . Tal tensor é conhecido como tensor de tensões.

Considerando um fluido em repouso, o tensor de tensões é escrito segundo a Equação 2.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} \quad (2)$$

sendo p o campo escalar de pressão associado ao tensor esférico δ_{ij} conhecido por Delta de Kronecker.

Para fluidos em movimento, o tensor de tensões é escrito segundo a Equação 3.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (3)$$

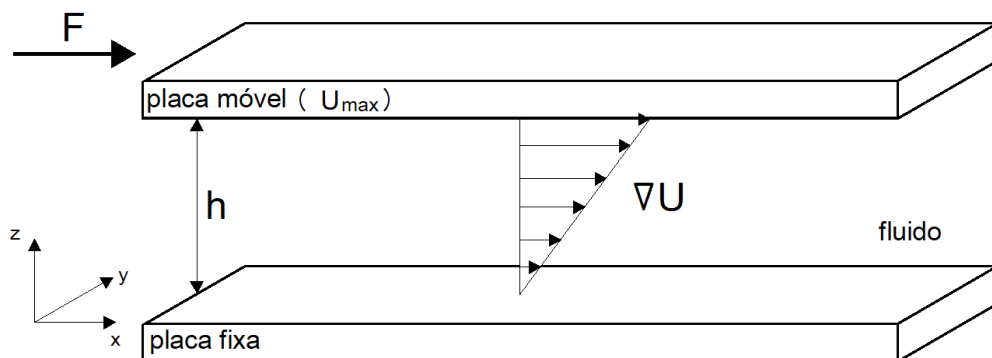
sendo o primeiro termo, $p\delta_{ij}$, a parte isotrópica, conhecida como parcela esférica do tensor de tensões, associada à pressão, e o segundo termo, τ_{ij} , a parte anisotrópica, também dita como parcela desviadora do tensor de tensões, a qual está associada à viscosidade do fluido.

2.2.2 Taxa de deformação

Sob a ação de tensões, um material sofrerá deformações. Tais deformações possibilitará o escoamento do material e que o mesmo atinja um novo estado de equilíbrio energético.

Considerando um fluido viscoso posicionado entre duas placas infinitas, separadas verticalmente por um espaço (h), faz-se com que uma das placas se mova com velocidade (U_{\max}), pela imposição de uma força tangencial (F), enquanto a outra é mantida parada, conforme Figura 1. Devido à condição de viscosidade do fluido e ao movimento da placa, as partículas irão se deformar, sendo que quantidade de movimento será transferida ao longo da camada de fluido em função do efeito viscoso (processo difusivo).

Figura 1 - Cisalhamento simples de um escoamento viscoso em regime laminar



Fonte: Elaboração do próprio autor

A taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), ao longo da camada de fluido, caracteriza o cisalhamento do fluido, e corresponde ao gradiente de velocidade ∇U das partículas em movimento, conforme Equação 4.

$$\dot{\gamma} = \nabla U \quad (4)$$

sendo ∇ o operador Nabla e U o campo de velocidade do escoamento.

A consideração descrita pela Figura 1 ilustra um fluido sob cisalhamento simples, neste caso, a taxa de deformação tem apenas uma componente, conforme Equação 5.

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial z} \quad (5)$$

No caso geral, a taxa de deformação, segundo notação indicial, é descrita pela Equação 6.

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

2.2.3 Viscosidade

A partir do modelo de Newton (escoamento viscoso entre placas paralelas), ilustrado pela Figura 1, verificou-se que a viscosidade é uma constante de proporcionalidade de primeira ordem que relaciona a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação. A viscosidade, por indicar a facilidade de escoamento contínuo sob a ação de uma tensão de cisalhamento externo, pode ser considerada a principal propriedade reológica de um fluido (OLIVEIRA et al., 2000).

De acordo com D'Ávila e Bretas (2005), a viscosidade pode ser definida como a propriedade que mede a resistência do material ao escoamento. Dessa forma, quanto maior a viscosidade do material, maior será sua resistência ao escoamento.

Pode-se dizer que a viscosidade é um indicativo da coesão entre as moléculas que constituem as lâminas adjacentes de um fluido. Fluidos mais viscosos apresentam maior coesão entre as moléculas do que os fluidos menos viscosos (HACKLEY; FERRARIS, 2001). Sendo assim, quanto menor a viscosidade de um fluido, menor é a tensão necessária para submetê-lo a uma determinada taxa de cisalhamento constante.

A viscosidade, segundo alguns autores, pode ser dividida em viscosidade diferencial e viscosidade aparente. Ambos os termos são aplicados às curvas tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação, sendo que a viscosidade diferencial é obtida a partir da inclinação de um dado ponto da curva e, a viscosidade aparente, a

partir da inclinação de uma reta ligando um ponto particular ao ponto de origem da curva (REIS, 2008).

2.3 MODELOS REOLÓGICOS

Os fluidos são classificados de acordo com o seu comportamento reológico, a partir da relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, em **Newtonianos** e **não-Newtonianos**.

2.3.1 Fluidos newtonianos

Os fluidos newtonianos são aqueles que apresentam uma relação constante entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, apresentando um comportamento reológico linear (MALKIN; ISAYEV, 2012), tal comportamento é visto em fluidos como água, mel, glicerina, óleo, etc. Nesses fluidos, a viscosidade se mantém constante com a variação da taxa de deformação (SCHRAMN, 2006).

Considerando um fluido Newtoniano, a parcela desviadora do tensor de tensões, Equação 3, sob condição de fluido incompressível e viscosidade constante, pode ser reescrita de acordo com a Equação 7.

$$\tau_{ij} = 2\mu D_{ij} \quad (7)$$

sendo μ a viscosidade do fluido (constante) e D_{ij} o tensor taxa de deformação.

Ao avaliar o tensor taxa de deformação D_{ij} , definido como a parte simétrica do gradiente de velocidade ∇U , e considerando fluido incompressível $\nabla \cdot U = 0$, conclui-se que apenas termos referentes ao efeito de cisalhamento devem ser considerados, conforme Equação 8.

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

Finalmente, pode-se concluir que o tensor de tensões σ_{ij} , para fluidos Newtonianos e incompressíveis, é dado pela Equação 9.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

Em condições de cisalhamento simples, o modelo de tensão de cisalhamento, de um fluido Newtoniano, é simplificado de acordo com a Equação 10.

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \dot{\gamma} \quad (10)$$

sendo τ a tensão de cisalhamento, μ a viscosidade absoluta e $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação.

2.3.2 Fluidos não-newtonianos

Os fluidos não-Newtonianos apresentam uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, sendo diversos fluidos descritos segundo tal comportamento, como por exemplo os polímeros, termoplásticos, fluidos de perfuração, tintas, concreto fresco e fluidos biológicos (IRGENS, 2008).

Em se tratando de fluidos não-Newtonianos, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação deve ser vista de maneira completa, estabelecendo a definição de dois conceitos relacionados à viscosidade (FIOROT, 2012): a viscosidade aparente e a viscosidade diferencial, conforme as Equações 11 e 12, respectivamente.

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (11)$$

$$\mu_{dif} = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} \quad (12)$$

sendo μ_{ap} a viscosidade aparente e μ_{dif} a viscosidade diferencial.

Além da viscosidade, há um outro importante parâmetro reológico, a tensão limite de escoamento. Segundo Dinkgreve et al. (2016), existem materiais que se deformam essencialmente de maneira elástica quando da aplicação de pequenas

tensões, mas escoam apenas quando uma tensão crítica é excedida. Essa tensão crítica é chamada de tensão limite de escoamento (τ_0).

Segundo Cheng (1986), a tensão limite de escoamento, em suspensões, é fruto das aglomerações das partículas, as quais formam uma estrutura espacial rígida. Dessa forma, tais estruturas se rompem apenas quando o nível de tensão aplicado supera a tensão limite de escoamento.

Diversos estudos recentes têm propostos a classificação de materiais com tensão limite de escoamento segundo duas categorias, os simples e os tixotrópicos. Os materiais de tensão limite de escoamento simples apresentam viscosidade dependente apenas da taxa de cisalhamento, e a tensão limite de escoamento está bem definida; de forma que tal parâmetro pode ser considerado uma propriedade do material (DINKGREVE et al., 2016).

Para os materiais de tensão de cisalhamento tixotrópicos, Dinkgreve et al. (2016) afirmam que a viscosidade depende, não apenas da taxa de cisalhamento, mas também do histórico de deformação do material, implicando em um comportamento reológico dependente da construção e quebra da microestrutura do material durante o escoamento.

Assim, o conceito de tixotropia está relacionado à variação de propriedades do fluido em função do tempo de solicitação, sendo, portanto, um efeito de dependência temporal. Fluidos cujas características reológicas são função do tempo podem ser caracterizados pela diminuição da viscosidade aparente com o tempo (fluido tixotrópico) ou seu aumento (fluido reopético ou anti-tixotrópico), quando sob uma taxa de cisalhamento constante. Tais fluidos têm como importante característica a sua reversibilidade, sendo possível recuperar a viscosidade se for oferecido um tempo de repouso ao material (SCHRAMN, 2006).

Há ainda fluidos que apresentam tanto características de sólidos elásticos quanto de líquidos viscosos, além de recuperação elástica parcial após a deformação, ou seja, possuem propriedades viscosas e elásticas acopladas. Esse tipo de fluido possui resistência à deformação proporcional ao efeito viscoso, acrescido do efeito elástico, este último, função do tempo (SHIROMA, 2012). Tais fluidos não-Newtonianos apresentam o chamado comportamento viscoelástico, sendo o modelo de Maxwell o primeiro a tentar descrevê-lo (BRETAS; D'ÁVILA, 2000).

Como apresentado, diversos são os comportamentos dos fluidos não-Newtonianos e, conseqüentemente, os modelos que os descrevem. Segundo Fiorot

(2012), no que diz respeito às equações constitutivas dos fluidos, diferentes são as formas de representá-las, desde a forma teórica, considerando características moleculares; a forma fenomenológica, relacionando a dinâmica dos fluidos a aspectos microestruturais; a forma fenomenológica modificada, descrevendo o fluido como isotrópico; até a forma empírica, como as desenvolvidas neste trabalho, relacionando parâmetros medidos por equipamentos de reometria.

A forma mais simples de desenvolver os modelos não-Newtonianos é por meio do modelo não-Newtoniano generalizado, o qual permite o uso das mesmas expressões de fluidos Newtonianos, mas tendo a viscosidade como função do segundo invariante da taxa de deformação. Assim, neste trabalho serão apresentados apenas modelos não-Newtonianos generalizados, de forma que a parcela desviadora do tensor de tensões pode ser escrita segundo a Equação 13.

$$\tau_{ij} = \frac{\tau_0}{\sqrt{-D_{II}}} D_{ij} + F(\sqrt{-D_{II}}) D_{ij} \quad (13)$$

sendo τ_{ij} a parcela desviadora do tensor de tensões, τ_0 a tensão limite de escoamento, D_{ij} o tensor taxa de deformação, D_{II} o segundo invariante do tensor taxa de deformação e F a função contínua positiva que tende para zero quando D_{II} tende para zero.

Os modelos reológicos de fluidos não-Newtonianos comumente empregados são os modelos de Bingham, de Herschel-Bulkley e Power-Law, conforme Equações de 14 a 19.

- Modelo de Bingham

$$\tau_0 \neq 0; \quad F(\sqrt{-D_{II}}) = 2\mu_\beta \quad (14)$$

$$\tau_{ij} = \frac{\tau_0}{\sqrt{-D_{II}}} D_{ij} + 2\mu_\beta D_{ij} \quad (15)$$

sendo τ_0 a tensão limite de escoamento e μ_β a viscosidade plástica.

- Modelo de Herschel-Bulkley

$$\tau_0 \neq 0; \quad F(\sqrt{-D_{II}}) = \frac{2^n K_n}{(\sqrt{-D_{II}})^{1-n}} \quad (16)$$

$$\tau_{ij} = \frac{\tau_0}{\sqrt{-D_{II}}} D_{ij} + \frac{2^n K_n}{(\sqrt{-D_{II}})^{1-n}} D_{ij} \quad (17)$$

sendo n o índice de escoamento e K_n o índice de consistência.

- Modelo Power Law (Lei de Potência)

$$\tau_0 = 0; \quad F(\sqrt{-D_{II}}) = \frac{2^n K_n}{(\sqrt{-D_{II}})^{1-n}} \quad (18)$$

$$\tau_{ij} = \frac{2^n K_n}{(\sqrt{-D_{II}})^{1-n}} D_{ij} \quad (19)$$

Considerando situações em que o fluido está sujeito ao cisalhamento simples, os modelos reológicos apresentados anteriormente são definidos de maneira simples, conforme Equações de 20 a 22.

- Modelo de Bingham

$$\tau = \tau_0 + \mu_\beta \dot{\gamma} \quad (20)$$

- Modelo de Herschel-Bulkley

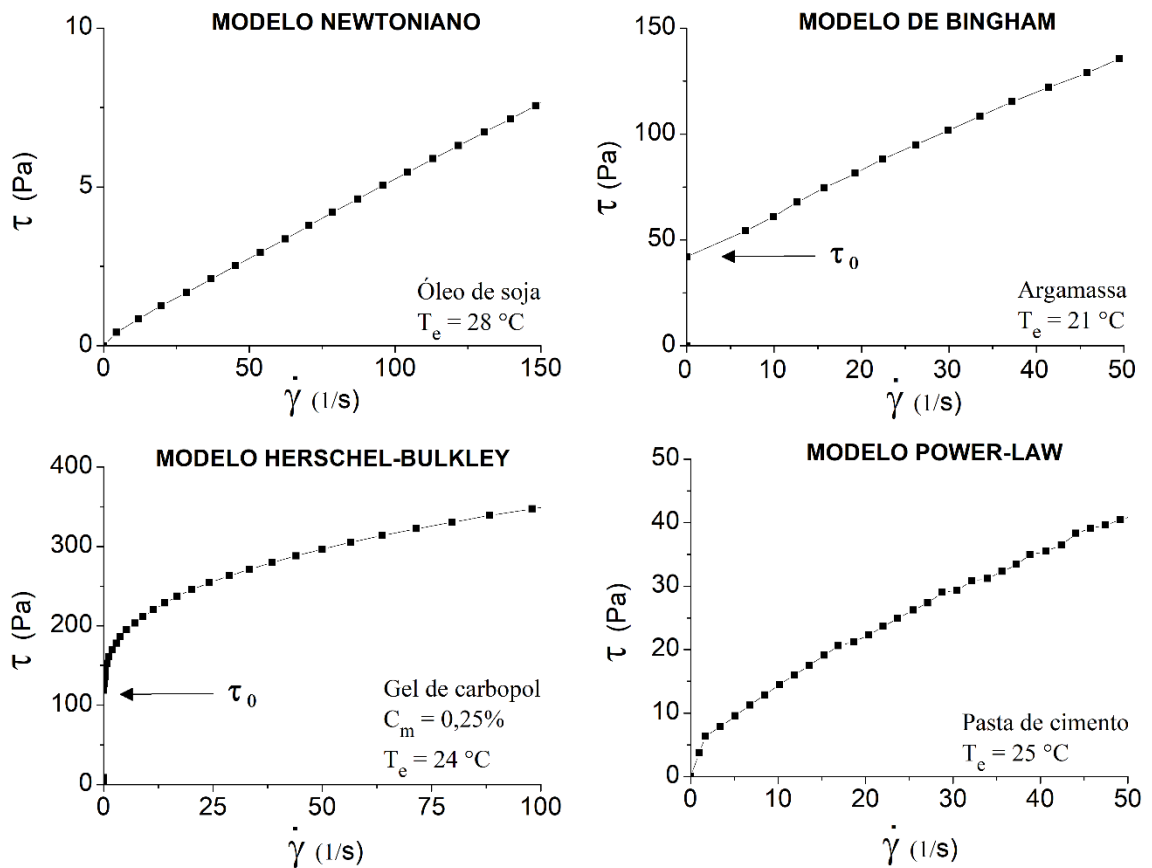
$$\tau = \tau_0 + K_n \dot{\gamma}^n \quad (21)$$

- Modelo Power Law (Lei de Potência)

$$\tau = K_n \dot{\gamma}^n \quad (22)$$

Pode-se apresentar o comportamento dos fluidos Newtonianos e não-Newtonianos, sob cisalhamento simples, a partir de uma curva conhecida como curva de fluxo ou reograma, a qual relaciona taxa de deformação e tensão de cisalhamento, conforme Figura 2.

Figura 2 - Curvas de fluxos de fluido Newtoniano e não-Newtoniano obtidas a partir do reômetro Brookfield R/S, para diversos materiais testados



Fonte: Elaboração do próprio autor

3 SLUMP TEST

A definição das características de escoamento de materiais cimentícios, mineralógicos, alimentícios, farmacêuticos e de outros setores é de extrema importância para a correta avaliação de tais materiais quando de suas aplicações.

Para isso, análises de caráter quantitativo devem ser realizadas a fim de definir os parâmetros reológicos de tais materiais como, por exemplo, a tensão limite de escoamento e a viscosidade. Entretanto, medir tais parâmetros exige o uso de equipamentos caros e sofisticados (reômetros), e não práticos para serem utilizados em campo.

Frente a essa dificuldade, buscou-se no *slump test*, ensaio da construção civil de avaliação, de caráter qualitativo, da consistência de concretos frescos, uma ferramenta para a obtenção dos parâmetros reológicos dos materiais, inicialmente focado para materiais cimentícios.

Desenvolveu-se assim, a partir do *slump test*, soluções analíticas, experimentais e numéricas para a definição dos parâmetros reológicos tensão limite de escoamento e viscosidade. Tal caráter do *slump test* permitiu a ampliação de seu uso, passando da construção civil, como ferramenta de avaliação de consistência de concretos frescos, para diferentes outros setores, como o da mineração, para avaliar as propriedades reológicas dos materiais.

Tendo, portanto, o *slump test* e sua capacidade de avaliação reológica como o foco do trabalho apresentado nesta Dissertação de Mestrado, os tópicos 3.1 e 3.2 apresentam as características do *slump test* como ensaio de controle tecnológico do concreto fresco e de avaliação reológica de materiais.

3.1 ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE: CONTROLE DE QUALIDADE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

O *slump test*, no Brasil conhecido por ensaio de abatimento de tronco de cone, é o método mais utilizado para avaliar as propriedades fluidas do concreto fresco (GEYER, 2006; SAAK, 2004). Segundo Bartos et al. (2002), o aparato foi desenvolvido nos Estados Unidos por volta de 1910, e acredita-se que o mesmo tenha sido utilizado pela primeira vez por Chapman. Entretanto, em muitos países, tal aparato é

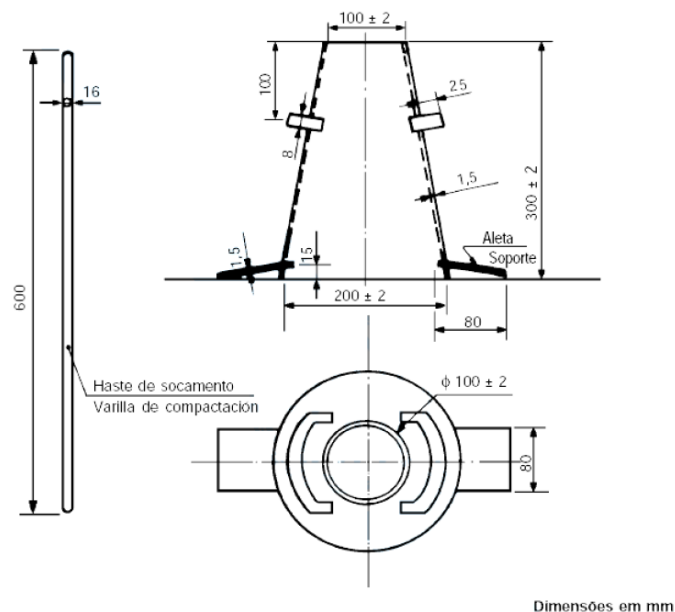
relacionado a Abrams, e inclusive o molde utilizado no ensaio é conhecido por cone de Abrams. Sua aprovação como ensaio padrão ASTM foi definida em 1922 e, desde então, ele tem sido utilizado em toda a América, Europa e Ásia como ensaio padrão para avaliar a consistência de concretos frescos.

Segundo Castro (2007), o ensaio de abatimento de tronco de cone é bastante utilizado em função de sua simplicidade de execução, além de apresentar caráter de uma excelente ferramenta para o controle de qualidade do concreto fresco, pois permite detectar pequenas mudanças na composição da mistura como, por exemplo, variações no teor de água a partir da especificação original. Saak et al. (2002) dizem ainda que o baixo custo associado ao ensaio reforça este ser o método de avaliação de consistência do concreto fresco mais utilizado na construção civil.

De acordo com Reis (2008), a desvantagem do ensaio de abatimento de tronco de cone está relacionada ao método fornecer respostas diferentes para uma mesma amostra de concreto quando realizado por diferentes operadores ou mesmo quando repetido por um mesmo operador. Popovics (1982) sugere ainda que para concretos com medida de abatimento na faixa de 25 mm a 175 mm, o coeficiente de variação de uma única medida do ensaio, obtida por um mesmo operador, poderia se aproximar de 10%.

No Brasil, a NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998) define os procedimentos e os itens utilizados na execução do ensaio de abatimento de tronco de cone e obtenção da medida qualitativa de consistência do concreto (abatimento). Basicamente, utiliza-se um tronco de cone metálico, também conhecido como cone de Abrams, aberto em ambas as extremidades (altura de 300 mm, diâmetro inferior de 200 mm e diâmetro superior de 100 mm) e uma placa metálica, plana, quadrada ou retangular não-absorvente (dimensão não inferior a 500 mm x 500 mm) na qual é disposto o tronco de cone, além de uma haste de compactação (altura de 600 mm, diâmetro de 16 mm e extremidades arredondadas). A Figura 3 ilustra os itens necessários para a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone.

Figura 3 - Ilustração do tronco de cone e haste de compactação segundo a NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998)



Fonte: NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998)

O ensaio consiste, basicamente, em dispor o tronco de cone sobre a placa metálica, pressionando-o contra a mesma, pelos pés do operador, mediante apoios existentes no tronco de cone, sendo, posteriormente, realizado o preenchimento do cone de acordo como o procedimento padrão. Após ser preenchido, o tronco de cone é levantado e com isso o concreto sofre um abatimento, o qual é medido. A norma define os seguintes passos para a realização do ensaio:

- 1) limpeza e umedecimento interno do molde e da placa de base. O molde deve ser colocado sobre a placa de base e esta deve estar disposta sobre uma superfície nivelada, rígida, plana, horizontal e livre de vibrações;
- 2) o molde é fixado através de suas aletas pelos pés do operador e o preenchimento do molde deve ser realizado em três camadas aproximadamente iguais. Cada camada é adensada com 25 golpes uniformemente distribuídos, aplicados com uma haste de socamento;
- 3) após o adensamento, o excesso de concreto é removido e uma limpeza da placa metálica de base é promovida;
- 4) o operador deve retirar o molde do concreto cuidadosamente, levantando-o na direção vertical com um movimento constante e vagaroso para cima, sem submeter o

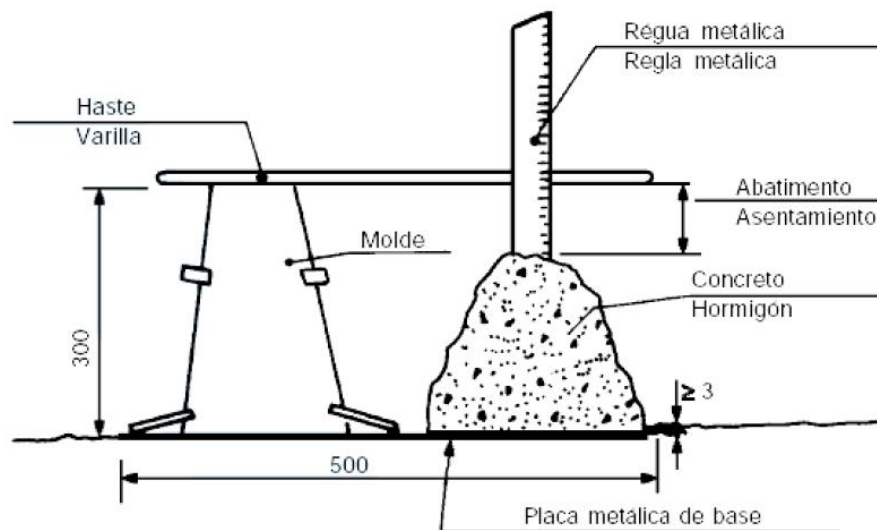
concreto a movimentos de torção lateral. A operação de retirar o molde deve ser realizada no intervalo de 5 a 10 segundos;

5) a operação completa, desde o início do preenchimento do molde com concreto até sua retirada, deve ser realizada sem interrupções e completar-se em um intervalo de 150 segundos. A duração total do ensaio, desde a coleta da amostra até o desmolde, deve ser de no máximo 5 minutos;

6) imediatamente após a retirada do molde, deve-se medir o abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de-prova, que corresponde à altura média do corpo-de-prova desmoldado, conforme ilustrado na Figura 4.

7) no caso de desmoronamento ou deslizamento da massa de concreto ao retirar o molde e não ser possível a leitura de abatimento, o ensaio deve ser desconsiderado e uma nova obtenção de abatimento deve ser realizada sobre outra porção de concreto da amostra.

Figura 4 - Medição do abatimento do concreto



Dimensões em mm

Fonte: NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998)

No ensaio de abatimento de tronco de cone, a tensão que promove a movimentação do material consiste no peso próprio do concreto por área (REIS,

2008). O material apenas irá parar de escoar quando a tensão de cisalhamento imposta a ele tornar-se-á igual ou menor à tensão limite de escoamento (SCHOWALTER; CHRISTENSEN, 1998). Conseqüentemente, a medida de abatimento estará relacionada ao ponto em que cessa o escoamento do material, este fortemente relacionado à sua tensão limite de escoamento (ROUSSEL; COUSSOT, 2005).

3.2 SLUMP TEST: MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS REOLÓGICOS

A avaliação dos parâmetros reológicos de materiais, de forma quantitativa, é possível a partir da reometria, a qual faz uso dos reômetros, equipamentos amplamente utilizados para medir as propriedades reológicas dos fluidos e suspensões, e que podem ser utilizados para estudos práticos e medidas de controle de qualidade de materiais. Os reômetros fornecem os dois parâmetros fundamentais para a descrição do comportamento reológico, a viscosidade e a tensão limite de escoamento (BAUER, 2006).

Os reômetros possibilitam um alto número de informações, reduzindo os custos com material e mão-de-obra. Além disso, as informações obtidas são mais objetivas, uma vez que o ensaio é totalmente automatizado e controlado por computador (REIS, 2008). Segundo Vidal (1997), os reômetros permitem o uso de pequenas amostras de materiais e fornecem uma relação contínua da relação taxa de deformação e tensão de cisalhamento, e uma faixa mais ampla da taxa de deformação, o que permite também uma análise mais adequada de comportamentos dependentes do tempo. Além disso, os reômetros podem ser configurados para operarem em conjunto com banhos térmicos (Figura 5.a), a fim de possibilitar controle de temperatura da amostra avaliada.

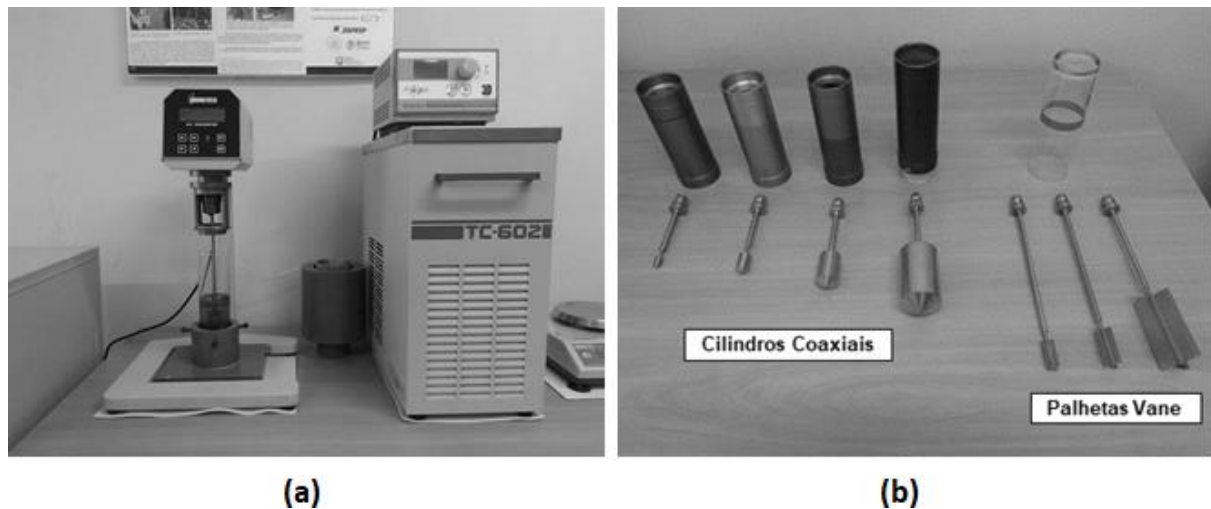
Segundo Klein (1992), os reômetros podem apresentar diferentes configurações, sendo os sistemas capilares e os sistemas rotacionais, os mais comuns. Nos sistemas capilares, o escoamento do fluido se dá, no interior de um tubo de seção circular, devido à diferença entre as pressões de entrada e saída do tubo, que podem ser geradas pela gravidade ou por outros mecanismos (LYKLEMA, 2005).

Já os sistemas rotacionais baseiam-se na rotação de um corpo cilíndrico (*spindle*), cônico ou circular, imerso em um fluido (material a ser analisado), o qual

sofre uma força de resistência viscosa quando se impõe uma velocidade rotacional ao sistema (SCHRAMM, 1998).

De modo geral, os reômetros podem ser classificados em relação à variável controlada (controla tensão ou taxa de deformação) e em relação à geometria do equipamento (cilindro coaxial, cone-placa e placa-placa). No caso de fluidos de partículas maiores que as especificadas para ensaios nas geometrias supracitadas, utiliza-se o reômetro com o sistema Vane, o qual se caracteriza por utilizar uma palheta, que possui uma superfície plana que se fixa ao material e o empurra, conforme o movimento de rotação ocorre (OLIVEIRA, 2013). A Figura 5.a ilustra o reômetro R/S (controle de tensão de cisalhamento e taxa de deformação) utilizado nesta pesquisa, enquanto a Figura 5.b apresenta alguns tipos de cilindros coaxiais e palhetas do sistema Vane de medição.

Figura 5 - Equipamentos de reometria: (a) reômetro rotacional e (b) cilindros coaxiais e palhetas do sistema Vane



Fonte: Elaboração do próprio autor

Mesmo sabendo da capacidade da reometria em bem avaliar o comportamento reológico dos materiais, seu uso é impedido, muitas das vezes, devido ao seu elevado custo, necessidade de operador capacitado e não praticidade para ser utilizado em campo. Assim, o *slump test* passou a ser utilizado como aparato simples e fácil de definição das propriedades reológicas de materiais.

Os primeiros estudos realizados, para tornar o *slump test* uma ferramenta de caracterização reológica, foram iniciados na década de 1980 com o desenvolvimento

de modelos analíticos que forneciam a relação entre abatimento e tensão limite de escoamento (Clayton et al., 2003). Murata (1984) forneceu a primeira relação entre esses dois parâmetros, segundo variáveis adimensionais, sendo seu estudo definido para molde de geometria cônica (cone de Abrams).

Anos depois, Christensen (1991) corrigiu o modelo, inicialmente desenvolvido por Murata (1984), e o consolidou como ferramenta para obtenção da tensão limite de escoamento a partir da medida de abatimento. Antes disso, Tanigawa e Mori (1989), por meio do Método de Elementos Finitos, modelou o comportamento da descida do material durante o ensaio de abatimento de tronco de cone.

Por meio do Método de Elementos Finitos, Kurokawa et al. (1994) avaliaram o comportamento de tensão limite de escoamento e viscosidade plástica de concretos a partir do *slump test*, comparando seus resultados com dados experimentais. Diferentes fatores foram avaliados pelos autores, destacando-se a relação linear entre abatimento e tensão limite de escoamento; velocidade de levantamento do cone de Abrams afetando a medida de abatimento e a possibilidade de usar moldes de diferentes formas e tamanhos.

Pashias et al. (1996) adaptaram o modelo de previsão de tensão limite de escoamento a partir do cone de Abrams para geometria cilíndrica. A partir da avaliação de abatimento de diferentes misturas de argilas e medição da tensão limite de escoamento por meio de reometria rotacional com palhetas Vane, Pashias et al. (1994) obtiveram boa concordância entre os dados fornecidos pelo modelo desenvolvido e aqueles medidos experimentalmente. Tal método passou a ser conhecido como técnica de Pashias e seu uso se tornou amplo, desde a indústria mineradora até a indústria alimentícia, devido à rapidez e baixo custo da técnica.

A partir do início da década de 2000, estudos passaram a avaliar a influência do molde utilizado no *slump test*. Clayton et al. (2003) avaliaram o comportamento da geometria do molde nas medidas de tensão limite de escoamento, para isso eles utilizaram modelos analíticos para geometria cônica, modelo de Schowalter e Christensen (1998), e para geometria cilíndrica, modelo de Pashias et al. (1996). A partir da avaliação de suspensões minerais (lamas da indústria mineradora), Clayton et al. (2004) concluíram que a geometria cilíndrica, de modelo matemático e forma mais simples, forneceu melhores resultados quando comparada à geometria cônica.

Na sequência, Saak et al. (2004) generalizou o modelo de previsão da tensão limite a partir da medida de abatimento em função da geometria do molde, verificando

excelente previsão de tensões limites de escoamento de diferentes materiais (pasta de cimento, de argilas e suspensões cerâmicas) a partir do modelo analítico desenvolvido, considerando geometria cilíndrica.

De forma geral, Clayton et al. (2003) e Saak et al. (2004) demonstraram boa concordância do modelo analítico para geometria cilíndrica, e que o mesmo permite a análise de diferentes tipos de materiais. Entretanto, a partir dos modelos supracitados, notaram-se discrepâncias para casos extremos de valores de tensões limites de escoamento (valor muito elevado e muito baixo).

Tais discrepâncias foram solucionadas no trabalho de Roussel e Coussot (2005), os quais concluíram que os modelos de previsão de tensão limite de escoamento a partir do *slump test* devem considerar as características de escoamento do material segundo não somente a medida de abatimento, mas também a medida de espalhamento (diâmetro da amostra deformada). Assim, ao avaliar a tensão limite de escoamento a partir do *slump test*, deve-se considerar os três regimes de domínio do escoamento, seja pela ação do peso do material (fase puramente inercial), seja pela ação do efeito viscoso (fase viscosa), seja pela ação da elevada fluidez, fases estas intimamente associadas e determinantes para o campo de velocidade do espalhamento do material que, em definitivo, vai explicar o abatimento final.

A partir de resultados experimentais, considerando mini tronco de cone e avaliação de pastas de cimentos, e de simulações numéricas, Roussel e Coussot (2005) concluíram que a determinação mais criteriosa da tensão limite de escoamento, a partir do *slump test*, deve considerar em que regime de escoamento se enquadra o material, além disso, tais modelos independem da geometria do molde, estando atrelados à condição final da amostra deformada. Entretanto, os autores alertam que tais modelos valem para a consideração do material como contínuo, de forma que em condições de fases granulares a predição da tensão limite de escoamento, a partir dos modelos desenvolvidos, pode tornar-se impossível.

Mais recentemente, Pierre et al. (2013) desenvolveram um modelo analítico para avaliar, com maior precisão, as tensões limites de escoamento a partir do *slump test* segundo o regime intermediário (medida do raio da amostra deformada da ordem da altura do molde). O modelo obtido apresentou boa capacidade de previsão de tensão limite de escoamento, sendo sua validação realizada a partir de medições experimentais de material polimérico (gel de carbopol). Dentre vários trabalhos acerca da modelagem analítica do abatimento, é apresentada, no Apêndice A, a modelagem

proposta por Roussel e Coussot (2005) e Pierre et al. (2013), esta confrontada com os resultados experimentais deste trabalho de mestrado.

Ultimamente, trabalhos numéricos a partir de softwares CFD (dinâmica dos fluidos computacional) têm sido desenvolvidos a fim de estabelecer equações para avaliação, não somente da tensão limite de escoamento, mas também da viscosidade dos materiais. Destaca-se o trabalho desenvolvido por Gao e Fourie (2015), os quais avaliaram, numericamente, o comportamento do material durante o *slump test*, segundo geometria cilíndrica, identificando a medida de espalhamento como ideal para avaliação da tensão limite de materiais de elevada fluidez. Além disso, os autores concluíram que a velocidade de levantamento do molde influencia fortemente o resultado de abatimento e espalhamento de materiais de elevada fluidez.

Bouvet et al. (2010), por meio de simulação numérica, avaliaram o comportamento de escoamento de pasta de cimento no mini tronco de cone, obtendo uma expressão para definição de viscosidade aparente, a partir da medida de espalhamento. Além disso, os autores concluíram que modelos analíticos clássicos de avaliação de propriedades reológicas, a partir da medida de abatimento, podem ser inadequados para materiais de baixa viscosidade, pois efeitos dinâmicos passam a ter importância sobre o comportamento de escoamento.

Choi et al. (2016), a partir de simulação numérica usando CFD, obteve formulações capazes de avaliar a tensão limite de escoamento e a viscosidade plástica, de concretos de ultra-alto desempenho (UHPC), a partir da medida de espalhamento do mini tronco de cone. Nota-se, ultimamente, com o desenvolvimento de materiais cimentícios de maior fluidez, estudos de técnicas de caracterização reológica a partir do *slump test*, segundo a medida de espalhamento.

Além dos trabalhos de base analítica e numérica, desenvolveram-se também avaliações experimentais, as quais buscaram validar os modelos desenvolvidos, bem como definir correlações empíricas para caracterizar reologicamente os materiais a partir da medida de abatimento. Nesse sentido, deve-se destacar o trabalho de Ferraris e De Larrard (1998), no qual foi desenvolvido o abatimento de tronco de cone modificado, cuja finalidade era obter a tensão limite de escoamento e viscosidade plástica de concretos a partir, respectivamente, da medida de abatimento e taxa média de abatimento.

A modificação realizada no abatimento de tronco de cone padrão para o desenvolvimento do aparato de abatimento de tronco de cone modificado foi a

colocação de uma haste vertical no centro da base de colocação do cone, e o uso de um disco deslizante. Desse modo, a tensão limite de escoamento do concreto foi relacionada ao abatimento, enquanto a viscosidade ao tempo para o material deslocar-se 100 mm.

O procedimento para a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado é simples e semelhante ao ensaio padrão, sendo que a modificação do procedimento se encontra na medição do tempo de descida do disco até atingir a marca de 100 mm na haste.

Com base na avaliação de uma ampla faixa de abatimento (de 100 a 260 mm), contando com a avaliação de 78 composições de concreto, Ferraris e De Larrard (1998) relacionaram as medidas de abatimento e tempo parcial de abatimento aos parâmetros tensão limite de escoamento e viscosidade plástica obtidos por um reômetro de avaliação de concreto.

No que diz respeito à abrangência do uso da medida de abatimento para obtenção de parâmetros reológicos, o *slump test* tornou-se ferramenta amplamente utilizada pela sua simplicidade de execução, baixo custo e por possibilitar excelente correspondência entre a medida de abatimento e de tensão limite de escoamento.

Diferentes setores da indústria utilizam a medida de abatimento como ferramenta de obtenção da tensão limite de escoamento como, por exemplo, a indústria alimentícia que faz uso do *slump test*, com geometria cilíndrica, para avaliar quantitativamente o efeito da composição e procedimentos de fabricação nas propriedades estruturais e funcionais dos alimentos (SUN; GUNASEKARAN, 2009).

O setor da mineração há anos faz uso do *slump test* como ferramenta de obtenção da tensão limite de escoamento de suspensões minerais de características não-Newtonianas, inclusive o desenvolvimento do modelo de Pashias et al. (1996) esteve atrelado à necessidade da indústria mineradora de alumina em avaliar a tensão limite de escoamento de resíduos lamosos para otimizar a disposição dos rejeitos (BOGER, 2009). De acordo com Boger (2013), a indústria mineradora foi pioneira no uso da geometria cilíndrica do *slump test* para avaliação da tensão limite de escoamento de suspensões minerais, sendo a ALCAN, hoje conhecida por RIO TINTO ALCAN (companhia mineradora), a primeira empresa a empregar tal ferramenta.

Recentemente no Brasil, com a ruptura da barragem de rejeitos de Fundão em 2015, estudos acerca da dinâmica de corridas de lama foram desenvolvidos. Para

isso, análises reológicas do rejeito foram realizadas. Dias (2017), em sua dissertação de mestrado, avaliou o comportamento de amostras de rejeitos oriundos da ruptura da barragem do Fundão segundo reometria rotacional e sistema Vane de medição. Couto (2017), em seu trabalho de mestrado, realizou simulações numéricas referentes ao evento da ruptura de tal barragem e, devido à consideração de rejeito de características não-Newtoniana, houve a necessidade de informações reológicas desse material, as quais foram obtidas a partir de caracterização reométrica fornecida por Dias (2017) e medidas de abatimento, a partir de *slump test* de geometria cilíndrica, segundo modelo analítico definido por Pashias et al. (1996).

Também tem sido utilizado a medida de abatimento na área de Geotecnia a fim de avaliar comportamento de tensão limite de escoamento e viscosidade. Campos e Galindo (2016) desenvolveram um *slump test* modificado a fim de relacionar as informações de taxa de deformação da amostra à viscosidade aparente, objetivando modelos empíricos para obtenção da viscosidade de solos, parâmetro esse importante quando da análise de corridas de detritos. Ribeiro (2015), em sua dissertação de mestrado, também fez uso da medida de abatimento para caracterização de rejeitos da mineração segundo a técnica de Pashias et al. (1996), além disso o autor desenvolveu um aparato experimental (viscosímetro coaxial de palhetas de baixo custo) para obtenção da tensão limite de escoamento e viscosidade plástica.

A medida de abatimento também tem sido utilizada para avaliar novos materiais desenvolvidos na área da mineração e construção civil. Azimi (2017) conduziu diferentes avaliações reológicas de misturas de areia-espuma usando o *slump test*, segundo geometria cilíndrica, a fim de identificar os efeitos de concentração de areia e proporção de espuma na reologia de misturas de areia-espuma.

Nesse contexto, é possível concluir a forte capacidade dos parâmetros associados ao *slump test*, medida de abatimento e tempo de abatimento, em fornecer informações de caracterização reológica de materiais. Nesse sentido, o trabalho desenvolvido foi baseado no ensaio de *slump test automatizado*, o que vem reduzir os erros associados ao ensaio padrão e inferir propriedades reológicas, tais como tensão limite de escoamento e viscosidade.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O Capítulo 4 apresenta o programa experimental do projeto de mestrado desenvolvido. Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento do aparato automatizado de *slump test*, a caracterização física dos materiais utilizados, bem como os procedimentos de preparação, caracterização reológica e medição de abatimento. Além disso, são apresentadas informações acerca da modelagem numérica realizada para o *slump test*.

4.1 PROPOSTA EXPERIMENTAL: APARATO AUTOMATIZADO DE SLUMP TEST

Os modelos analíticos e empíricos desenvolvidos para a determinação de parâmetros reológicos de materiais (destaque aos materiais cimentícios e de mineração) a partir da medida de abatimento, apresentam capacidade de bem descrever tais parâmetros. Entretanto, a obtenção de tal medida está sujeita a erros decorrentes do operador. Além disso, o desenvolvimento de modelos numéricos desse ensaio é capaz de realizar a previsão das características dos materiais a serem utilizados, bem como possibilitar melhor entendimento dos mesmos, o que vai exigir a validação do modelo numérico utilizado.

Assim, o desenvolvimento de um aparato experimental automatizado de *slump test* tem capacidade de minimizar os erros decorrentes do ensaio comumente realizado⁽³⁾, garantindo maior qualidade à medida de abatimento, seja para uso como controle de qualidade de materiais, seja para previsão de parâmetros reológicos. Ao mesmo tempo, a capacidade do aparato em monitorar o comportamento do ensaio (uso de sensor e medição contínua do abatimento no tempo) torna-o capaz de validar as simulações numéricas.

Dessa forma, o desenvolvimento do aparato automatizado de *slump test* mostra-se como uma ferramenta de importante valor para atividades experimentais e numéricas relacionadas à medida de abatimento.

O desenvolvimento de tal aparato é anterior a este projeto de mestrado, sendo que Pereira et al. (2016) obteve uma versão operacional do equipamento, a qual teve

⁽³⁾ Ensaio de abatimento de tronco de cone - Norma NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998).

seu uso limitado a concretos com pequeno espalhamento. Neste projeto de mestrado, partiu-se do aparato desenvolvido no grupo RMVP ⁽⁴⁾ por Pereira et al. (2016), realizando alterações em sua estrutura física, bem como no sistema de tratamento de dados. Tais alterações permitiram a obtenção de um aparato capaz de analisar diferentes materiais, estes das mais variadas faixas de abatimento e espalhamento, além de possibilitar maiores informações acerca do ensaio devido às alterações impostas ao tratamento de dados.

Então, partindo do trabalho realizado por este mestrando em seu Trabalho de Conclusão de Curso, foi possível realizar mudanças e aprimoramentos no aparato automatizado de *slump test*, desenvolvendo a versão definitiva do mesmo, a partir do qual define-se este projeto de mestrado.

O aparato automatizado de *slump test* foi definido como um conjunto de diferentes sistemas (sistema de levantamento, sistema de leitura de abatimento e sistema de aquisição e tratamento de dados), cujos detalhes construtivos serão apresentados nos itens 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3.

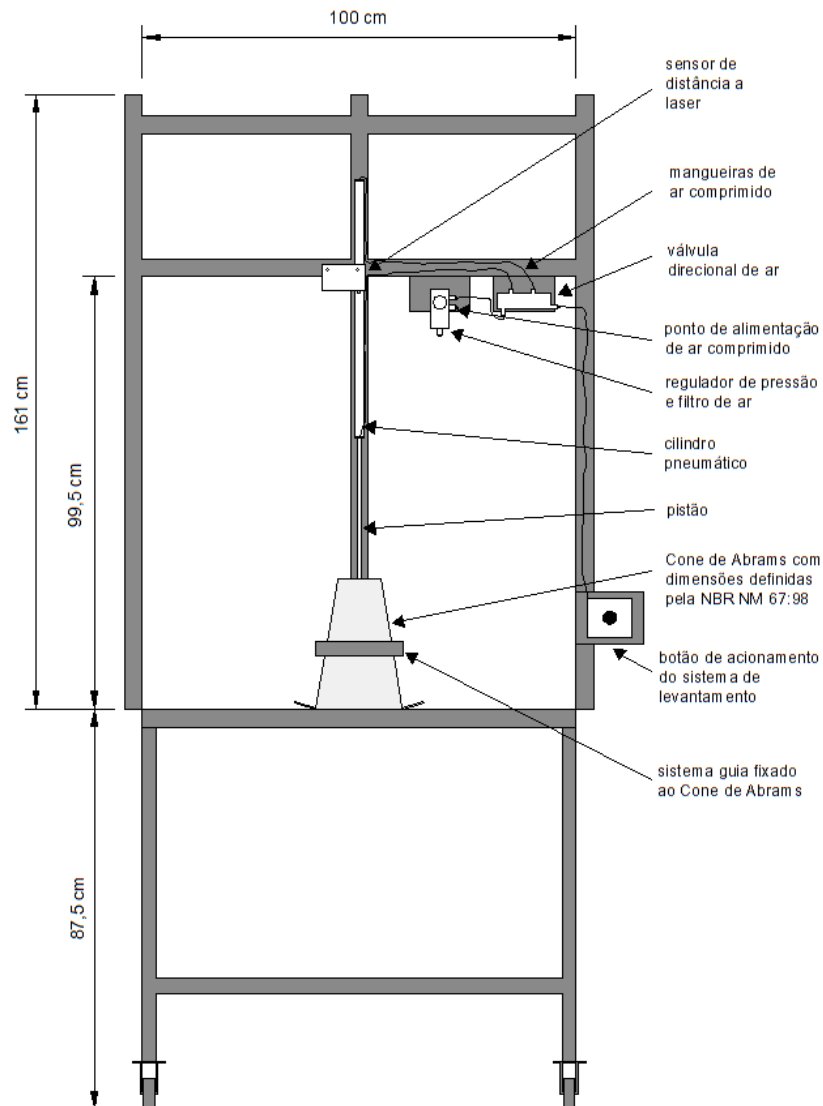
4.1.1 Sistema de levantamento

O sistema de levantamento é composto por uma mesa quadrada de 1,00 m de largura por 1,00 m de comprimento dotada de rodas em sua base, permitindo mobilidade ao aparato. A partir da mesa, eleva-se a estrutura superior (estrutura de suporte) responsável pela fixação do sensor de medição a laser e sistema pneumático.

Por meio de um sistema guia, posicionado sobre a mesa, é feita a ligação entre o cone de Abrams e o sistema de automatização da subida e descida do cone, este último composto por regulador de pressão, filtro de ar comprimido, cilindro pneumático, válvula direcional com acionamento elétrico e botão elétrico responsável pelo acionamento do sistema pneumático. Por meio da Figura 6 é possível identificar os elementos que compõem o sistema de levantamento, bem como suas dimensões originais.

⁽⁴⁾ RMVP: Grupo de Pesquisa em Reologia de Materiais Viscosos e Viscoplasticos

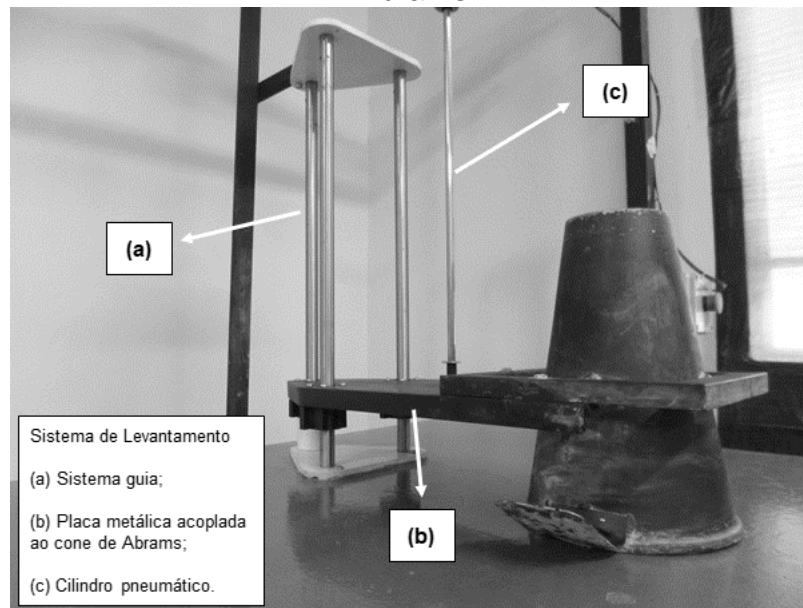
Figura 6 - Representação esquemática do aparato automatizado de *slump test*



Fonte: Elaboração do próprio autor

A fim de garantir a suspensão vertical e sem movimentos laterais do cone de Abrams, decidiu-se por utilizar um sistema guia. No sistema guia utilizaram-se três barras cilíndricas conectadas a uma placa metálica ligada ao cilindro pneumático, sendo que em tal placa era acoplado o cone de Abrams. O cilíndrico pneumático ao elevar a placa metálica, eleva também o cone de Abrams, e este não sofre movimentos laterais em função da configuração de três barras cilíndricas do sistema guia, conforme ilustrado pela Figura 7.

Figura 7 - Sistema guia: configuração definida para evitar movimentação do cone de Abrams



Fonte: Elaboração do próprio autor

Entretanto, o uso do sistema guia sobre a mesa, tido como necessário para garantir a verticalidade da subida do cone de Abrams, diminuiu o espaço útil da mesa. Esse fato tornou necessário o desenvolvimento de uma configuração de ligação entre sistema guia e cone de Abrams capaz de possibilitar maior distância entre esses elementos, de forma a não perder a capacidade de verticalidade de levantamento do cone de Abrams, tampouco possibilitar sua movimentação lateral.

A nova configuração do sistema guia permitiu superar as dimensões mínimas da placa metálica sobre a qual realiza-se o ensaio de abatimento de tronco de cone, placa quadrada de no mínimo 0,50 m x 0,50 m conforme NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998), estabelecendo sobre a mesa uma região de 0,70 m x 0,70 m para o desenvolvimento da amostra durante o ensaio de abatimento de tronco de cone.

Com relação ao cone de Abrams, ele foi fabricado com chapa metálica revestida por zarcão, a fim de protegê-lo contra ferrugem. O seu tamanho seguiu os padrões definidos pela NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998), com 300 mm de altura, 200 mm de diâmetro inferior e 100 mm de diâmetro superior.

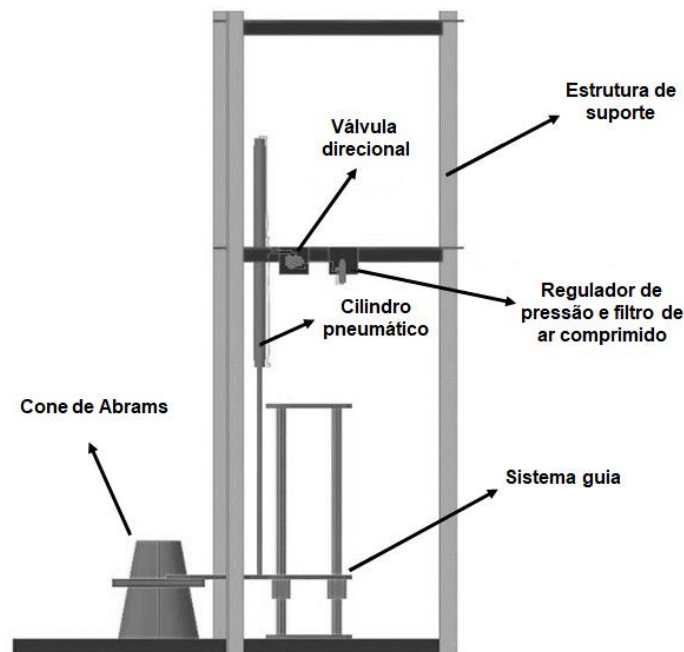
Neste aparato, a imobilização do tronco de cone, antes realizada pelo peso do operador sobre as aletas laterais do molde, bem como o processo de levantamento do cone, passou a ser realizada pelo sistema pneumático. A fim de garantir a estabilidade do cone, durante o processo de levantamento, um sistema guia foi

utilizado, conforme mencionado anteriormente. A Figura 9 apresenta o cone de Abrams sobre a mesa de ensaio.

Um aspecto importante do aparato desenvolvido é o controle da velocidade de levantamento do cone de Abrams, que permite a tal aparato executar o ensaio de abatimento de tronco de cone conforme a norma NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998). Tal controle de velocidade é realizado a partir do regulador de pressão do sistema pneumático, de forma a obedecer ao tempo de levantamento definido, segundo a NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998), de 5 a 10 segundos. Para todos os testes realizados, definiu-se a velocidade de levantamento do cone de Abrams em 6 segundos.

A Figura 8 apresenta um esquema do aparato, identificando o sistema de levantamento, e enumerando todos os componentes desse sistema, conforme mencionados anteriormente.

Figura 8 - Vista lateral do aparato automatizado de *slump test*



Fonte: Elaboração do próprio autor

4.1.2 Sistema de medição

O sistema de medição implantado objetivou obter, automaticamente, o valor de abatimento do material no ensaio e o seu comportamento de descida, de forma a diminuir a influência do operador na medição do abatimento e ao mesmo tempo obter dados capazes de serem correlacionados ao comportamento reológico do material.

Foi escolhido um sensor fotoelétrico de medição de deslocamento a laser para ser o responsável pela medição do abatimento.

O aparelho de medição foi definido como ideal pela sua característica de medir deslocamento e por proporcionar leituras com pequenos erros. O sistema de medição utilizado foi o sensor fotoelétrico de medição de distância a laser modelo VDM28-8-L-IO/110/115b/122 da empresa PEPPERL+FUCHS, o qual é alimentado por uma fonte de tensão de 10 volts. A Tabela 1 apresenta algumas características do sensor.

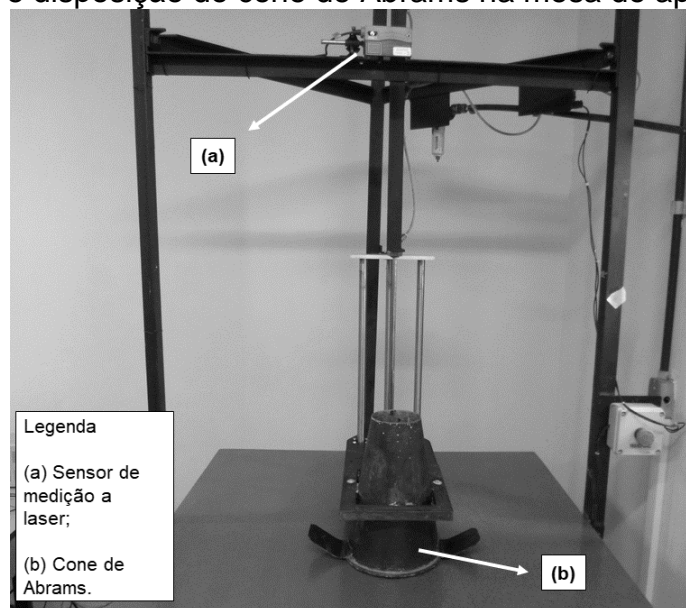
Tabela 1 - Características do sensor de medição a laser utilizado

Faixa de medição (m)	Erro absoluto da medida (mm)	Tempo de resposta (ms)	Tensão de operação (V)
0,2 - 8	± 25	394,90	10 - 30 DC

Fonte: Elaboração do próprio autor

O sensor de deslocamento foi colocado cerca de um metro acima da base da mesa, sendo que seu feixe luminoso foi direcionado para o centro do cone de Abrams. Para a fixação do sensor de deslocamento foi criado um suporte capaz de ajustar o nível do sensor, a fim de garantir a verticalidade do feixe de luz. A Figura 9 ilustra o posicionamento do sensor de deslocamento no aparato.

Figura 9 - Sensor de medição a laser posicionado no aparato automatizado de *slump test* e disposição do cone de Abrams na mesa do aparato

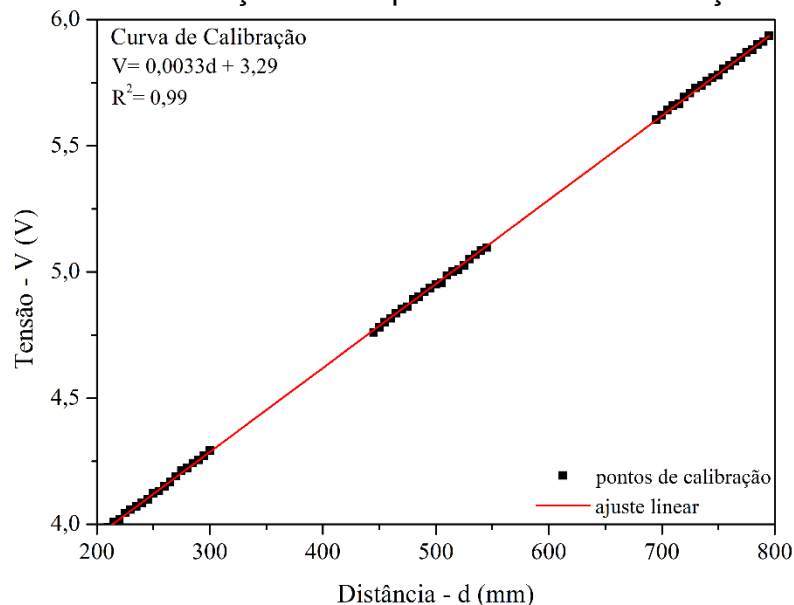


Fonte: Elaboração do próprio autor

No que diz respeito às medidas realizadas pelo sensor de medição a laser, foi necessário a definição de uma curva de calibração a fim de relacionar a tensão em um ponto de interesse, parâmetro de fato medido pelo sensor, à distância referente a esse ponto.

No processo de calibração do sensor, associaram-se valores de tensões a valores de distâncias incrementados de 5 em 5 mm por meio de um micrômetro. A Figura 10 ilustra a curva de calibração obtida, bem como a equação de calibração definida.

Figura 10 - Curva de calibração obtida para o sensor de medição a laser utilizado

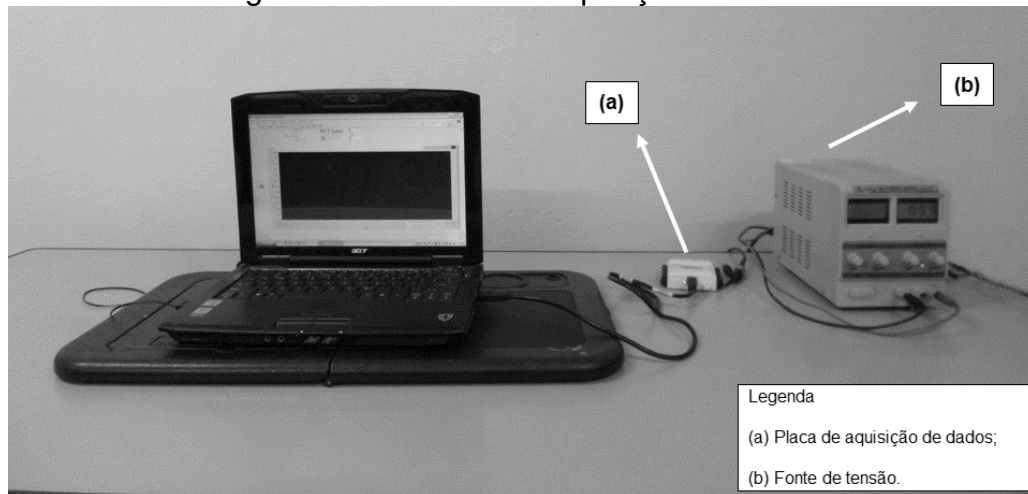


Fonte: Elaboração do próprio autor

4.1.3 Sistema de aquisição de dados

A obtenção dos dados fornecidos pelo sensor de medição a laser foi realizada pelo módulo de aquisição de dados USB-6009 da National Instruments, cujas características de funcionamento são compatíveis com as do sensor utilizado. A Figura 11 ilustra a placa de aquisição de dados utilizada e a fonte de tensão para alimentação do sensor.

Figura 11 - Sistema de aquisição de dados



Fonte: Elaboração do próprio autor

Utilizando-se de cabos de ligação, o módulo de aquisição de dados foi ligado ao sensor de deslocamento, e a partir de uma conexão USB ligou-se o módulo de aquisição de dados ao computador. Utilizando-se do software LabVIEW definiram-se as características de aquisição de dados por meio da definição da taxa de amostragem, definida para este trabalho em 20 Hz, e implementou-se, na programação de aquisição de dados, a curva de calibração estabelecida para o sensor de forma a obter, a partir do LabVIEW, dados referentes à descida do material durante o ensaio de abatimento de tronco de cone.

4.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Para a avaliação do aparato automatizado de *slump test*, diferentes materiais foram testados, avaliando-se polímeros representativos de lamas encontradas em pé de barragem; lamas propriamente ditas produzidas a partir de argila; argamassas e concretos. Os tópicos de 4.2.1 a 4.2.6 apresentam os componentes utilizados na composição dos materiais avaliados neste projeto de mestrado. Motivado pela característica do projeto, o desenvolvimento do aparato e a obtenção das medidas de abatimento, não houve uma completa caracterização dos materiais utilizados.

4.2.1 Polímero carbopol

Utilizou-se o polímero carbopol, especificamente o Carbopol 996 na forma de pó fornecido pela empresa EMFAL. Esse material é definido como um polímero acrílico hidrossolúvel que ao ser neutralizado forma estruturas com maior viscosidade. A concentração de mistura de tal polímero irá aumentar ou diminuir a consistência do gel produzido, definindo assim suas características de escoamento. A Tabela 2 apresenta características físicas e químicas do polímero Carbopol 996 fornecidas por seu produtor.

Tabela 2 - Características do polímero Carbopol 996

Aspecto físico (25°C)	Odor	Cor	Viscosidade, solução 0,5% em água (cps)
pó fino	característico	branco	80000,00

Fonte: Boletim técnico EMFAL

4.2.2 Argila caulínica

A partir de trabalhos anteriores realizados no grupo RMVP acerca de escoamento lamosos, decidiu-se pelo uso da argila caulínica em função de sua mistura com água formar uma mistura estável (SANTOS, 2003) e, portanto, ideal para testes em laboratório.

A argila caulínica utilizada é do tipo São Simão (utilizada na indústria de cerâmica branca) e fornecida pela empresa MINASOLO. A Tabela 3 apresenta informações características da argila utilizada segundo informações de seu produtor.

Tabela 3 - Características da argila caulínica São Simão

Composição química (%)				pH	Densidade aparente (g/cm ³)	Densidade real (g/cm ³)
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂			
> 50,07	> 31,54	> 1,50	> 1,15	4,0 a 6,0	0,40 a 0,55	2,614

Fonte: Boletim técnico da empresa Minasolo (2016)

4.2.3 Cimento

O cimento utilizado na composição das argamassas e do concreto foi o cimento Portland com escória granulada de alto forno e resistência mínima à compressão de

32 MPa aos 28 dias (CP II E 32) da empresa Holcim Brasil S.A., com massa específica de 3,05 g/cm³ e massa unitária 1,09 g/cm³.

4.2.4 Agregado miúdo

Foi utilizado apenas um tipo de agregado miúdo, a areia média, oriunda da região de Ilha Solteira - SP. A areia média foi secada ao sol e armazenada em tambores fechados. A areia média foi definida com massa específica seca de 2,62 g/cm³, massa específica aparente de 2,61 g/cm³, módulo de finura de 2,02 e diâmetro máximo característico de 4,75 mm.

4.2.5 Agregado graúdo

Utilizou-se a brita tipo I de origem basáltica, proveniente de uma jazida localizada na região de Ilha Solteira - SP. A secagem deste agregado foi realizada ao sol e seu armazenamento foi feito em tambores fechados. A brita tipo I foi definida com massa específica seca de 2,87 g/cm³, massa específica aparente de 2,90 g/cm³, módulo de finura de 6,60 e diâmetro máximo característico de 19 mm.

4.2.6 Água de amassamento

Para a produção de argamassa e concreto, utilizou-se a água distribuída pela rede pública de abastecimento de água potável da cidade de Ilha Solteira - SP, de acordo com as recomendações da NBR 15900:2009 (ABNT, 2009).

4.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste tópico são apresentados os procedimentos de produção dos géis de carbopol, lamas, argamassas e concreto, especificando os procedimentos de mistura. Além disso, são apresentadas as metodologias de caracterização reológica e de realização do ensaio de abatimento de tronco de cone segundo a norma NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998) e aparato automatizado de *slump test*.

4.3.1 Gel de carbopol

A produção dos géis se deu em diferentes concentrações, em massa de carbopol (C_m), a saber: 0,15%, 0,17%, 0,20%, 0,22%, 0,25%, 0,27% e 0,32%. A confecção de géis com diferentes concentrações teve como objetivo obter amostras com uma ampla faixa de tensão limite de escoamento (entre 30 e 150 Pa).

O preparo do gel de carbopol seguiu os procedimentos descritos por Minussi (2007). O pó de carbopol foi adicionado em água deionizada e a mistura foi agitada por meio de um misturador a fim de promover sua dispersão. Para finalizar o processo, a dispersão água + carbopol foi neutralizada com hidróxido de sódio (NaOH). Com o intuito de promover uma melhor visualização do escoamento do gel, um corante (azul de metileno) foi adicionado ao processo final de mistura. O pH dos géis produzidos foi de $7,00 \pm 0,20$, indicando sua correta neutralização.

As massas específicas dos géis de carbopol variaram de 990 a 1017 kg/m³, sendo próximas à massa específica da água devido à baixa concentração em massa do polímero. Os géis produzidos foram armazenados e mantidos à temperatura ambiente.

4.3.2 Lama

As lamas avaliadas neste trabalho foram preparadas a partir da mistura de argila e água deionizada. Utilizou-se argila caulínica com massa específica de 2772 kg/m³, tal massa específica foi obtida segundo a adaptação do ensaio de determinação de massa específica do cimento Portland, conforme NBR 16605:2017 (ABNT, 2017), para argila.

As lamas foram produzidas segundo diferentes concentrações em volume de argila (C_v), a saber: 27,5%, 30,0%, 31,0%, 32,5% e 34,0%. O preparo da lama ocorreu a partir da mistura manual de argila e água deionizada, procedimento esse realizado por cerca de 10 minutos, totalizando um volume de lama de 10 litros. Cada concentração de lama teve sua massa específica avaliada, sendo que as massas específicas das lamas variaram de 1450 a 1560 kg/m³.

4.3.3 Argamassa

As composições de argamassas utilizadas nesta pesquisa foram obtidas a partir de traços de concreto de alto desempenho (CAD) dosados por Oliveira (2013). A fim de obter argamassas com diferentes valores de abatimento, definiram-se quatro diferentes composições de argamassas, nomeadas como ARG 1, ARG 2, ARG 3 e ARG 4. A Tabela 4 apresenta a composição das argamassas produzidas.

Tabela 4 - Composição das argamassas produzidas

Composição	Relação Água/Cimento (%)	Água (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Areia Média (kg/m ³)
ARG 1	47,50	301,77	635,32	1221,30
ARG 2	50,00	317,66	635,32	1221,30
ARG 3	52,50	333,54	635,32	1221,30
ARG 4	55,00	249,43	635,32	1221,30

Fonte: Elaboração do próprio autor

O procedimento de mistura adotado para a produção das argamassas obedece à sequência pré-definida por Oliveira (2013), conforme a sequência:

- 1) mistura do agregado miúdo e metade da água, na velocidade baixa, por trinta segundos em uma argamassadeira, sendo em seguida misturados na velocidade rápida por mais trinta segundos;
- 2) adição de cimento e o restante da água. Mistura dos materiais por trinta segundos na velocidade baixa e mais dois minutos e meio na velocidade rápida;
- 3) interrupção do processo de mistura por três minutos para repouso da argamassa e limpeza das pás e da cuba da argamassadeira;
- 4) reinício do processo de mistura por mais três minutos na velocidade rápida e obtenção da mistura final.

4.3.4 Concreto

A composição de concreto utilizado nesta pesquisa foi baseada na composição de Pereira et al. (2016). Definiu-se apenas um traço de concreto convencional, fixando a relação água cimento e obtendo abatimento de 20 ± 3 cm. A composição do concreto produzido é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição do concreto produzido

Relação Água/Cimento (%)	Água (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Areia Média (kg/m ³)	Brita tipo I (kg/m ³)
56,00	221,15	394,90	803,00	994,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

A preparação do concreto foi desenvolvida de acordo com a sequência de mistura adotada por Pereira et al. (2016), a saber:

- 1) umedecimento da betoneira e adição do agregado graúdo, miúdo e metade da água, que foram misturados por um minuto;
- 2) adição do cimento e restante da água, os quais foram misturados por três minutos;
- 3) o processo foi interrompido por três minutos para repouso e limpeza das pás e das paredes da betoneira;
- 4) a betoneira foi ligada por mais dois minutos e obteve-se a mistura final.

4.3.5 Caracterização reológica

A caracterização reológica dos géis de carbopol, lamas e argamassas foi realizada por meio de um reômetro (Brookfield R/S, de controle de taxa de deformação e tensão de cisalhamento) com o sistema de medição Vane 40/20. É importante informar que a não caracterização reológica do concreto produzido mediante reometria ocorreu pela limitação do reômetro utilizado.

O procedimento consistiu em impor ao material uma taxa de tensão cisalhante a fim de obter a sua deformação. Os géis de carbopol foram analisados segundo a imposição, durante 60 s, de uma taxa crescente de cisalhamento, até atingir 600 Pa. As lamas também foram analisadas a partir da aplicação de uma taxa crescente de cisalhamento, até atingir 800 Pa, entretanto tal procedimento ocorreu durante 180 segundos. Da mesma forma, as argamassas foram submetidas a aplicação de uma taxa crescente de cisalhamento até atingir 1000 Pa, processo esse realizado por 120 segundos.

Todos os ensaios foram realizados à temperatura controlada de 24 ± 1 °C, no mesmo ambiente em que ocorreu os *slump test* e imediatamente após essa medida ter sido obtida. Para verificar a repetibilidade dos parâmetros reológicos e, a

estabilidade dos géis de carbopol, lamas e argamassa com o tempo, houve a repetição da caracterização reológica da seguinte forma:

- Gel de Carbopol: dez (10) repetições para cada concentração produzida;
- Lama: oito (8) repetições para cada concentração produzida;
- Argamassa: três (3) repetições para cada composição produzida, sendo cada composição avaliada segundo três diferentes tempos (10 min, 30 min e 50 min após a mistura de cimento no processo de mistura), a fim de avaliar a evolução do abatimento e da tensão limite de escoamento.

Na obtenção dos resultados de tensão limite de escoamento, definiu-se o modelo reológico de melhor ajuste aos dados e delimitou-se a deformação, dos três materiais analisados, entre 1 s^{-1} e 150 s^{-1} .

4.3.6 Medida de abatimento

As medidas de abatimento foram obtidas a partir do equipamento automatizado desenvolvido, descrito no item 4.1. Após o preenchimento do molde com o material a ser analisado (gel de carbopol, lama, argamassa e concreto), o mesmo foi levantado por meio do sistema de levantamento do equipamento e a amostra passou a escoar em função da ação da gravidade.

Cessado o escoamento do material em análise, o deslocamento vertical da amostra (medida de abatimento) foi obtido a partir do sensor de medição a laser, o qual capturou a informação de descida do material durante todo o tempo de escoamento da amostra. A partir da medida de abatimento, pôde-se correlacioná-la à tensão limite de escoamento e, considerando o tempo para ocorrer o abatimento, foi possível avaliar a viscosidade dos materiais em análise. As medidas de abatimento foram conduzidas em ambiente climatizado à temperatura de $24 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. A repetibilidade de abatimento foi realizada conforme a repetibilidade dos ensaios reométricos.

A fim de avaliar a operacionalidade do aparato, as medidas de abatimento para o gel de carbopol foram obtidas, simultaneamente, pelo ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998), e a partir do aparato automatizado.

As medidas de abatimento de concreto também foram realizadas segundo o ensaio normatizado e o aparato automatizado de *slump test*, mas neste caso o objetivo

foi verificar a influência do operador no ensaio de abatimento de tronco de cone. Para isso, diferentes operadores (de diferentes formações acadêmicas - engenheiro civil, engenheiro agrônomo, matemático, engenheiro mecânico - mas já instruídos sobre o procedimento de realização do ensaio) realizaram o ensaio de abatimento de tronco de cone, enquanto o mesmo concreto era avaliado segundo o equipamento desenvolvido. Cada operador realizou o ensaio uma vez segundo quatro diferentes tempos (10 min, 30 min, 50 min e 70 min após a mistura de cimento no processo de mistura).

De forma geral, a repetibilidade das medidas de abatimento foi definida da seguinte forma:

- Gel de Carbopol: dez (10) repetições para cada concentração produzida, segundo o ensaio de abatimento de tronco de cone e o aparato automatizado de *slump test*;
- Lama: oito (8) repetições, a partir do aparato automatizado de *slump test*, para cada concentração produzida;
- Argamassa: três (3) repetições, a partir do aparato automatizado de *slump test*, para cada composição produzida, sendo cada composição avaliada segundo três diferentes tempos (10 min, 30 min e 50 min após a mistura de cimento no processo de mistura);
- Concreto: um (1) ensaio de abatimento de tronco de cone, para cada operador, e simultaneamente realização da medida de abatimento a partir do aparato desenvolvido, considerando quatro diferentes tempos (10 min, 30 min, 50 min e 70 min após a mistura de cimento no processo de mistura).

A realização do ensaio de abatimento de tronco de cone se deu conforme os procedimentos descritos pela NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998), já a obtenção da medida de abatimento por meio do aparato automatizado de *slump test* ocorreu conforme o roteiro apresentado a seguir:

- 1) suspensão do cone por meio do botão de *start*; limpeza e umedecimento interno do molde e da base da mesa;
- 2) abaixamento do cone e, preenchimento do mesmo com os materiais a serem avaliados. No caso dos géis de carbopol e lamas não houve a necessidade de adensamento da amostra, entretanto, para as argamassas e concretos, seguiu-se o procedimento de moldagem do cone de Abrams, conforme NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998), preenchendo o cone segundo três (3) camadas iguais, sendo cada camada

adensada com 25 golpes uniformemente distribuídos, aplicados com uma haste de socamento;

3) após o adensamento, remoção do excesso de material e limpeza da mesa;

4) preparação do *software* computacional para a leitura dos dados do sensor dando *start* na função de medir e, imediatamente, acionamento do botão de *start* do sistema de levantamento;

5) limpeza do cone e da mesa e, retirada do material presente na mesa;

6) obtenção do valor de abatimento no software LabVIEW e exportação dos dados de abatimento e tempo de abatimento para planilha do Excel para tratamento dos dados.

4.4 PROPOSTA DE MODELAGEM: SIMULAÇÃO DO SLUMP TEST

Desenvolveu-se, paralelamente ao trabalho experimental, a modelagem numérica do *slump test*. A modelagem desse ensaio foi realizada a partir de um pacote computacional de análise de dinâmica dos fluidos, o ANSYS FLUENT 14.5, aplicando o método dos volumes finitos para resolução das equações de conservação (Conservação da Massa e de Quantidade de Movimento sob hipótese de fluido homogêneo, incompressível e sob condições isotérmicas).

A modelagem numérica foi realizada para fluidos do tipo não-Newtoniano (gel de carbopol e lama), necessitando de uma função contínua para a viscosidade aparente; para tal, o código numérico implementa a função dada pela Equação 23 (Fluent 14.5 User's Guide, 2012).

$$\mu_{ap} = \begin{cases} \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K_n \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^{n-1} & , \text{para } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c \\ \tau_0 \frac{\left(2 - \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)}{\dot{\gamma}_c} + K_n \left[(2 - n) + (n - 1) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right] & , \text{para } \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c \end{cases} \quad (23)$$

sendo μ_{ap} a viscosidade aparente, $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação, $\dot{\gamma}_c$ a taxa de deformação crítica, τ_0 a tensão limite de escoamento, K_n o índice de consistência e n o índice de escoamento.

A garantia da continuidade da função da viscosidade aparente no modelo numérico apresenta um alto grau de dependência da taxa de deformação crítica, parâmetro este essencial para o sucesso ou insucesso da simulação numérica de fluidos não-Newtonianos com modelo reológico de Herschel-Bulkley. Sob taxas de deformação inferiores ao valor da taxa de deformação crítica, o fluido se comportará como um fluido Newtoniano de alta viscosidade; caso contrário, o fluido se comportará de acordo com o modelo de Herschel-Bulkley. O ajuste deste parâmetro numérico é feito através de testes de sensibilidade, adotando-se um valor de $\dot{\gamma}_c$ baixo o suficiente para simular adequadamente o modelo de Herschel-Bulkley, porém alto o suficiente para que não haja instabilidades numéricas (GAO; FOURIE, 2015).

A presença de uma interface entre o fluido teste e o ar requer um modelo de rastreamento de fronteiras para a captura desta interface no código numérico. Uma das técnicas utilizadas para este fim, pelo software, é a técnica *VOF (Volume of Fluid)*, considerando um fluido imiscível ao outro. Para cada fase, introduz-se uma nova variável escalar “Fração de Volume” que varia de 0 a 1; o valor 1 caracteriza o fluido teste, o valor 0 caracteriza o ar e qualquer valor entre ambos caracteriza a interface de ambos os fluidos. Portanto, este método não determina a posição exata da superfície livre entre ambos fluidos, já que um campo de fração de volume (com valores entre 0 e 1) é determinado e a superfície livre está contida neste campo (Fluent 14.5 User’s Guide, 2012).

No que diz respeito à simulação do *slump test*, a axissimetria do caso *slump test* possibilita a simulação numérica ser bidimensional (2D), viabilizando resultados com menor custo computacional quando comparado com simulações numéricas tridimensionais. A Figura 12 ilustra a projeção do cone de Abrams com suas medidas em centímetros, seu respectivo domínio computacional, subtraído de regiões onde não há escoamento do fluido teste, e as condições de contorno do problema. O domínio foi discretizado espacialmente em 60383 elementos retangulares de dimensões 1 mm x 1 mm.

A estabilidade da simulação numérica é obtida com a condição CFL (Courant-Friedrichs-Lewy, ou Número de Courant), baixa, sendo recomendação $CFL < 0,25$ para se garantir a boa estabilidade. A condição CFL pode ser obtida pela Equação 24.

$$C = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (24)$$

sendo C o Número de Courant, Δt o passo de tempo, Δx o tamanho da malha e u o módulo da velocidade.

O passo de tempo utilizado foi de $5 \times 10^{-4}s$, garantindo a boa estabilidade numérica, e o número de iterações foi de 40 iterações por passo de tempo. A simulação numérica do *slump test* foi realizada considerando como materiais em análise os géis de carbopol e as lamas, não sendo modelado o *slump test* para argamassas. Os dados reológicos dos fluidos em análise, necessários para a alimentação do modelo numérico, foram obtidos a partir do reômetro R/S utilizado nesta pesquisa. Os resultados das simulações numéricas foram confrontados aos resultados experimentais fornecidos pelo aparato automatizado desenvolvido, permitindo a sua avaliação.

4.5 ANÁLISE DIMENSIONAL A SERVIÇO DA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS REOLÓGICOS A PARTIR DA MEDIDA DE ABATIMENTO

Sendo um dos objetivos deste trabalho de Mestrado a definição de correlações entre parâmetros reológicos e medidas fornecidas pelo aparato automatizado, propôs-se, a partir de uma análise dimensional, determinar grupos adimensionais, representativos do fenômeno envolvido no *slump test*.

Sabe-se que diversos problemas podem ser resolvidos por, além de soluções analíticas, soluções baseadas em resultados experimentais. Para isso é necessário determinar as variáveis que contribuem para a ocorrência de um dado fenômeno e, como isso, escrever o funcional do parâmetro desejado.

Considerando como objetivo deste mestrado a obtenção de tensão limite de escoamento e viscosidade, duas avaliações foram realizadas a partir de análise dimensional. A primeira buscou definir o funcional da tensão limite de escoamento e, a segunda, o funcional da viscosidade.

4.5.1 Análise dimensional: tensão limite de escoamento

Com relação à análise dimensional desenvolvida, definiu-se a tensão limite de escoamento (τ_0) função dos seguintes parâmetros: medida do abatimento (S), altura do cone de Abrams (H), massa específica do material (ρ) e aceleração da gravidade (g).

Assim, o funcional da tensão limite pode ser visto conforme Equação 25.

$$\tau_0 = \varphi(S, H, \rho, g) \quad (25)$$

O desenvolvimento da análise dimensional permitiu a obtenção de 2 adimensionais (π_n).

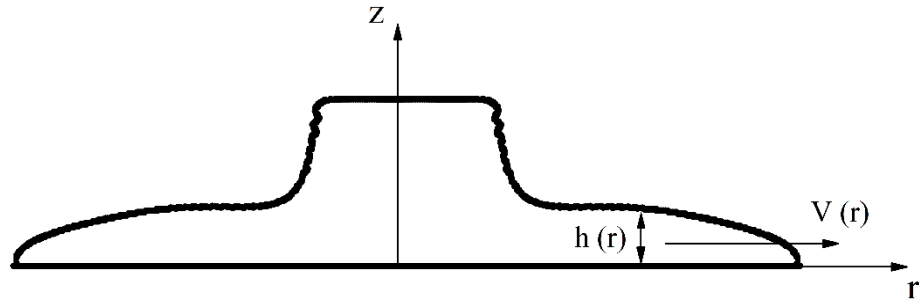
$$\pi_1 = \frac{S}{H} \quad (26)$$

$$\pi_2 = \frac{\tau_0}{\rho g H} \quad (27)$$

4.5.2 Análise dimensional: viscosidade aparente

Em função do trabalho reunir materiais pseudoplásticos (fluido do tipo Herschel-Bulkley e Dilatante), a viscosidade a ser avaliada é dependente da taxa de deformação que está sendo imposta ao fluido, sendo chamada de viscosidade aparente. Nesse sentido, foi necessário definir qual a taxa de deformação a ser utilizada nas análises. Para isso, foi avaliada a velocidade radial do material durante o ensaio e sua respectiva altura vertical, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Esquema para definição da taxa de deformação envolvida no *slump test*



Fonte: Elaboração do próprio autor

Considerando a descida do material e seu comportamento final segundo coordenadas cilíndricas (r, θ, z) e condição de geometria axissimétrica, pode-se prescrever que $V_\theta = 0$ e, por conseguinte, todas as variáveis são independentes de θ ($\partial/\partial\theta = 0$). Assim, a taxa de deformação será dita como sendo a relação entre a velocidade radial (V_r) e a altura da amostra deformada (h_r), conforme Equação 28.

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial V_r}{\partial z} \quad (28)$$

A avaliação da taxa de deformação foi realizada a partir de valores médios de V_r e h_r , conforme Equação 29.

$$\dot{\gamma}_{\text{médio}} = \frac{\Delta V_r}{\Delta h_r} \quad (29)$$

Então, utilizando-se de filmagens dos ensaios realizados no aparato automatizado de *slump test* e, a partir do software livre de edição de imagem TRACKER, foi possível avaliar as velocidades radiais e as alturas ao longo do raio da amostra deformada, calculando então, a partir da Equação 29, as taxas de deformações médias envolvidas nos ensaios de *slump test*.

Com relação à análise dimensional desenvolvida, definiu-se a viscosidade aparente (μ_{ap}) do material, durante o *slump test*, função dos seguintes parâmetros: medida do abatimento (S), tempo de abatimento (T), altura do cone de Abrams (H), tensão limite de escoamento (τ_0), massa específica do material (ρ) e aceleração da gravidade (g). Assim, o funcional da viscosidade aparente pode ser visto conforme Equação 30.

$$\mu_{ap} = \varphi(S, H, \rho, g, \tau_0, T) \quad (30)$$

O desenvolvimento da análise dimensional permitiu a obtenção de 4 adimensionais (π_n), sendo dois deles obtidos quando da análise dimensional da tensão limite de escoamento (Equação 26 e Equação 27).

$$\pi_3 = \sqrt{\frac{g}{H}} T \quad (31)$$

$$\pi_4 = \frac{\mu_{ap}}{\rho \sqrt{g} H^{3/2}} \quad (32)$$

Sabendo-se da relação entre a medida de abatimento e a tensão limite de escoamento, optou-se por utilizar o adimensional referente à medida de abatimento (π_1) e relacionaram-se os adimensionais π_3 e π_4 , obtendo-se um novo adimensional, conforme Equação 33.

$$\pi^* = \frac{\mu_{ap}}{\rho g H T} \quad (33)$$

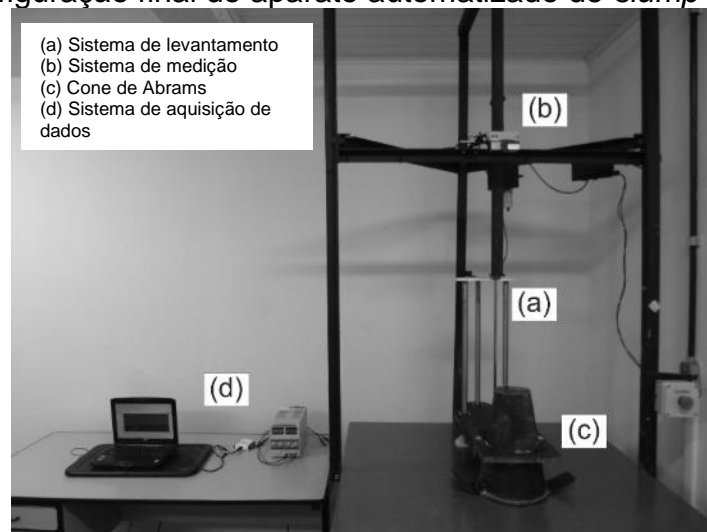
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Capítulo 5 apresenta os resultados experimentais e de modelagem numérica relacionados ao aparato automatizado de *slump test*. Inicialmente, é apresentada a configuração final do aparato desenvolvido, demonstrando o seu comportamento em termos de operacionalidade e medidas fornecidas. Posteriormente, são apresentados os resultados acerca das medidas de abatimento e caracterização reológica, bem como as correlações definidas para obtenção da tensão limite de escoamento a partir da medida de abatimento. Por fim, o resultado obtido por meio de simulação numérica é confrontado e discutido com o resultado fornecido pelo aparato automatizado de *slump test*.

5.1 APARATO AUTOMATIZADO DE SLUMP TEST

No que diz respeito ao aparato automatizado de *slump test* apresentado nesta dissertação de mestrado, é possível verificar sua capacidade em realizar, de maneira automatizada, o levantamento do cone de Abrams e a medida do abatimento. Além disso, tal aparato permite a obtenção de informações que são capazes de fornecer parâmetros reológicos (tensão limite de escoamento e viscosidade). A Figura 14 ilustra, de forma completa, o aparato automatizado de *slump test* e seus componentes.

Figura 14 - Configuração final do aparato automatizado de *slump test* desenvolvido



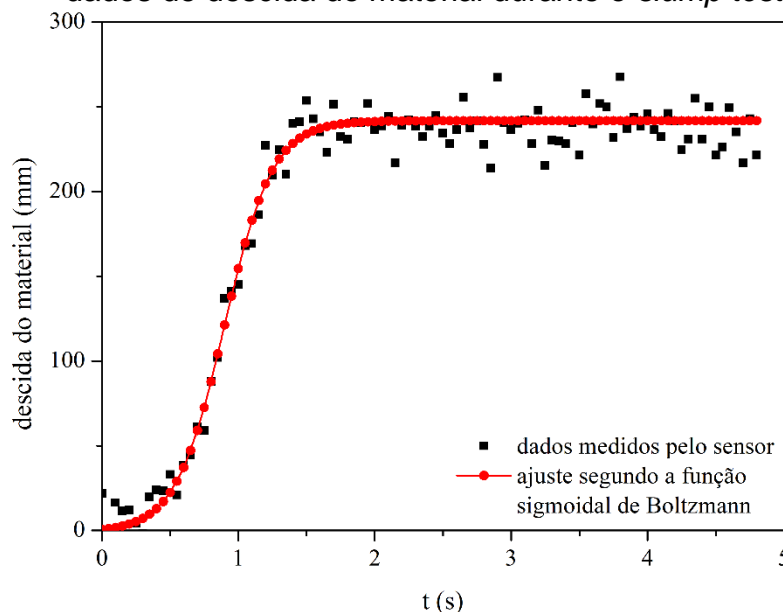
Fonte: Elaboração do próprio autor

5.1.1 Medidas fornecidas pelo aparato automatizado de slump test

A partir do sistema de medição de distância a laser que compõem o aparato automatizado desenvolvido, tornou-se possível avaliar o comportamento de descida do material durante o *slump test*.

Inicialmente, a curva de descida do material em função do tempo de ensaio foi analisada segundo um filtro de média móvel, a fim de avaliar o valor de abatimento, entretanto tal filtro não estava garantindo boas análises no regime transiente. Em função disso, uma nova forma de análise dos dados foi buscada, sendo que o uso do modelo sigmoidal de Boltzmann foi a melhor forma encontrada para bem descrever o comportamento do material durante o ensaio, conforme ilustrado pela Figura 15.

Figura 15 - Comportamento da função sigmoidal de Boltzmann como ajuste dos dados de descida do material durante o *slump test*

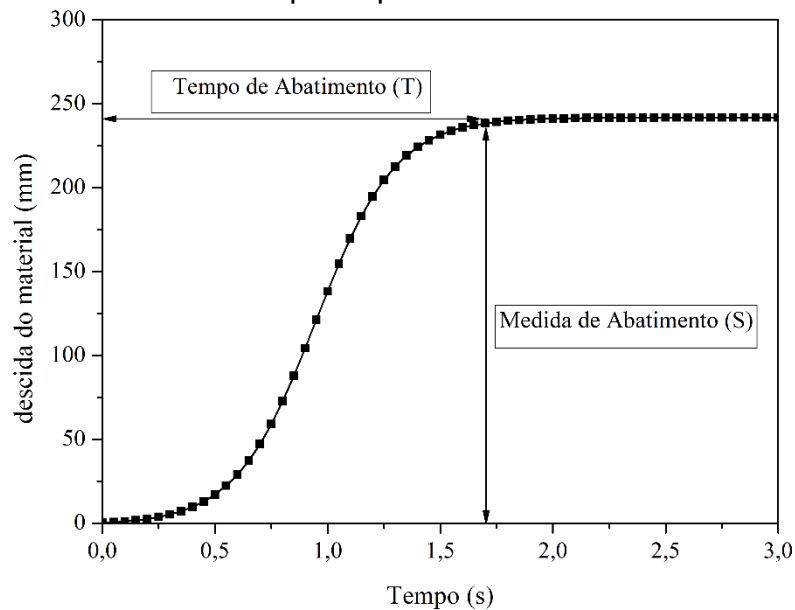


Fonte: Elaboração do próprio autor

Como se observa na Figura 15, o uso da função sigmoide possibilitou o ajuste dos dados experimentais segundo uma função conhecida, sendo, portanto, possível afirmar que o deslocamento do material no *slump test* apresenta o comportamento de uma sigmoide. Tal comportamento é observado em trabalhos como o de Murata (1984), Chidiac et al. (2000) e de Gao e Fourie (2015).

Ajustado o comportamento de descida do material durante o *slump test* segundo a função sigmoidal de Boltzmann, as medidas de abatimento e do tempo para sua ocorrência foram definidas conforme ilustrado pela Figura 16.

Figura 16 - Definição da medida de abatimento e do tempo de abatimento a partir dos dados fornecidos pelo aparato automatizado desenvolvido



Fonte: Elaboração do próprio autor

5.1.2 Comparação de abatimentos obtidos a partir do aparato automatizado de slump test e slump test manual

A fim de verificar o comportamento das medidas de abatimento obtidas segundo o aparato automatizado de *slump test*, os géis de carbopol foram avaliados, simultaneamente, a partir do procedimento de ensaio para materiais cimentícios, conforme NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998), e aparato automatizado desenvolvido. A opção em utilizar o gel de carbopol para a avaliação do funcionamento do aparato automatizado foi função de sua característica de fluido teste, cujas características são bem definidas e controláveis ao longo do tempo, evitando alterações no decorrer das avaliações. A Tabela 7 apresenta os dados obtidos segundo os dois métodos utilizados para avaliar os abatimentos dos géis de carbopol.

A partir da Tabela 7 nota-se o baixo desvio padrão dos abatimentos medidos no equipamento, comprovando sua capacidade em repetir de forma similar o ensaio de *slump test*.

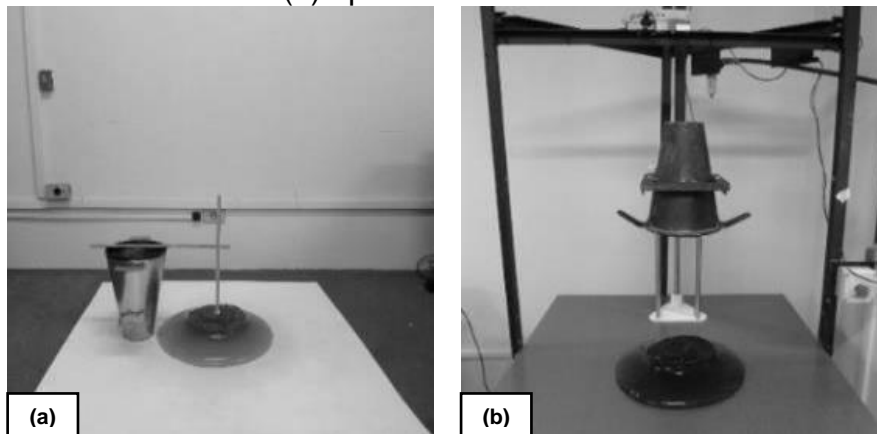
Tabela 7 - Dados médios e desvios padrão de abatimentos obtidos segundo aparato automatizado e NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998)

Concentração em massa (%)	Abatimento automatizado (mm)	Abatimento manual (mm)
0,15	257,2 ± 1,8	253,4 ± 2,1
0,17	242,9 ± 1,7	246,2 ± 2,4
0,20	237,8 ± 3,8	239,7 ± 3,2
0,22	226,4 ± 2,9	227,3 ± 3,6
0,25	218,9 ± 2,4	217,5 ± 3,2
0,27	213,1 ± 3,3	214,4 ± 3,9
0,32	206,2 ± 4,9	202,8 ± 5,9

Fonte: Elaboração do próprio autor

Ao mesmo tempo, a similaridade entre os valores de abatimentos medidos segundo os dois métodos utilizados comprova a capacidade do aparato em reproduzir, de forma real, o comportamento do ensaio de abatimento de tronco de cone. A Figura 17 ilustra os abatimentos segundo os dois métodos de análise empregados.

Figura 17 - Comportamento do gel de carbopol: (a) NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998) e (b) aparato automatizado



Fonte: Elaboração do próprio autor

5.1.3 Avaliação do operador na realização do ensaio de abatimento de tronco de cone

O desenvolvimento do aparato automatizado de *slump test* teve como primeiro objetivo a definição de uma ferramenta de controle de qualidade do concreto fresco baseada na realização automatizada do ensaio de abatimento de tronco de cone. A automatização da realização do ensaio mostrou-se como uma forma de reduzir a

influência do operador nas medidas de abatimento, vista como uma das grandes desvantagens de tal ensaio (REIS, 2008).

Já tendo resultados acerca da operacionalidade do aparato automatizado de *slump test*, pôde-se avaliar o comportamento do operador na realização do ensaio de abatimento de tronco de cone e confrontar tais resultados com aqueles obtidos no aparato automatizado. Para isso, concretos convencionais foram produzidos e ensaiados por diferentes operadores a partir do ensaio normatizado e, simultaneamente, medidas de abatimentos foram obtidas no aparato automatizado. Os resultados obtidos para essa análise são expostos na Tabela 8.

Tabela 8 - Medidas de abatimento de concreto convencional obtidas pelo aparato automatizado e segundo o ensaio de abatimento de tronco de cone por meio de diferentes operadores

Operador	<i>Slump</i> norma (mm)				<i>Slump</i> automatizado (mm)			
	10 min	30 min	50 min	70 min	10 min	30 min	50 min	70 min
1	210,0	203,0	182,0	174,0				
2	204,0	210,0	196,0	174,0	205,4	193,8	185,1	159,7
3	205,0	195,0	187,0	155,0				
4	220,0	207,0	201,0	195,0				
5	217,0	205,0	206,0	180,0				
6	260,0	250,0	225,0	175,0	205,3	192,8	169,0	167,9
7	215,0	210,0	198,0	168,0				
Média	218,7	211,4	199,3	174,4	205,3	193,3	177,0	163,8
Desvio padrão	5,0	17,8	14,0	12,1	0,1	0,7	11,4	5,8

Fonte: Elaboração do próprio autor

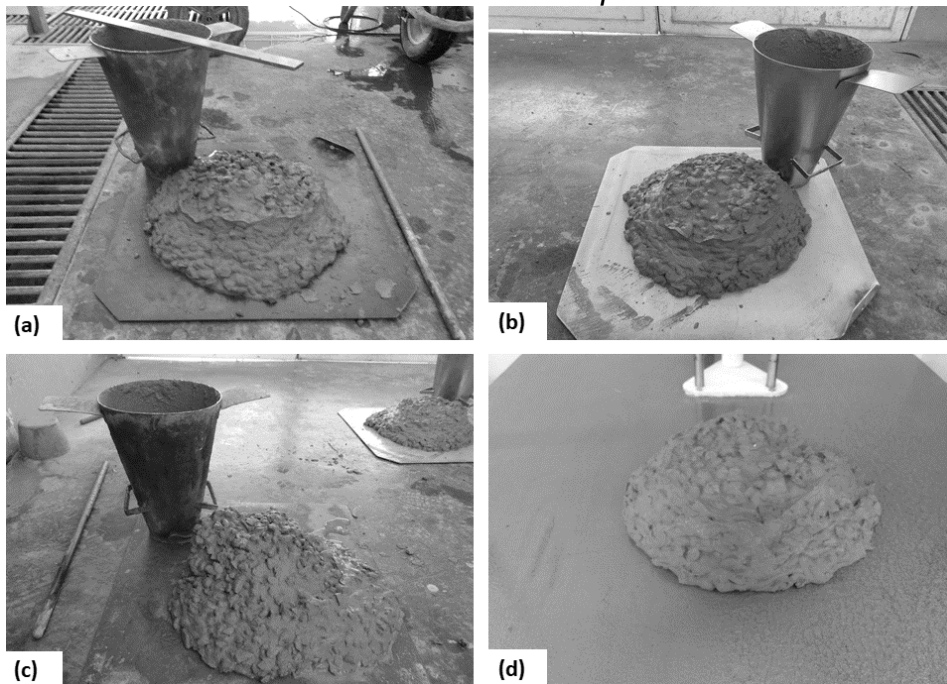
Os resultados apresentados na Tabela 8 demonstram que o aparato automatizado de *slump test* foi capaz de gerar dados de abatimento sem grandes variações de medida, com desvio padrão máximo da ordem de 10 mm, enquanto nota-se, a partir do ensaio de abatimento de tronco de cone, maiores diferenças entre as medidas obtidas pelos diferentes operadores. Dessa forma, é possível demonstrar a capacidade do aparato automatizado desenvolvido em realizar com maior rigor o levantamento do cone de Abrams e a medida de abatimento.

Diferente do comportamento obtido para os géis de carbopol, em que as medidas de abatimento, segundo os dois métodos, apresentaram proximidade dos valores, nota-se, para os testes com concreto e com diferentes operadores, uma

diferença entre os valores médios de abatimento. Os valores de abatimento obtidos no aparato automatizado foram sempre inferiores àqueles medidos no ensaio padrão, tal resultado pode ser associado, principalmente, à forma controlada de levantamento do cone de Abrams, realizando-o no tempo definido pela NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998).

Além das diferenças em termos da medida de abatimento, notaram-se grandes variações da amostra deformada de concreto segundo o operador que realizou o ensaio. A Figura 18 ilustra as diferenças no comportamento final da amostra para alguns operadores, confirmando a influência do operador no ensaio de abatimento de tronco de cone.

Figura 18 - Comportamento do concreto no tempo 10 min após: (a), (b) e (c) ensaio NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998) segundo diferentes operadores e (d) aparato automatizado de *slump test*



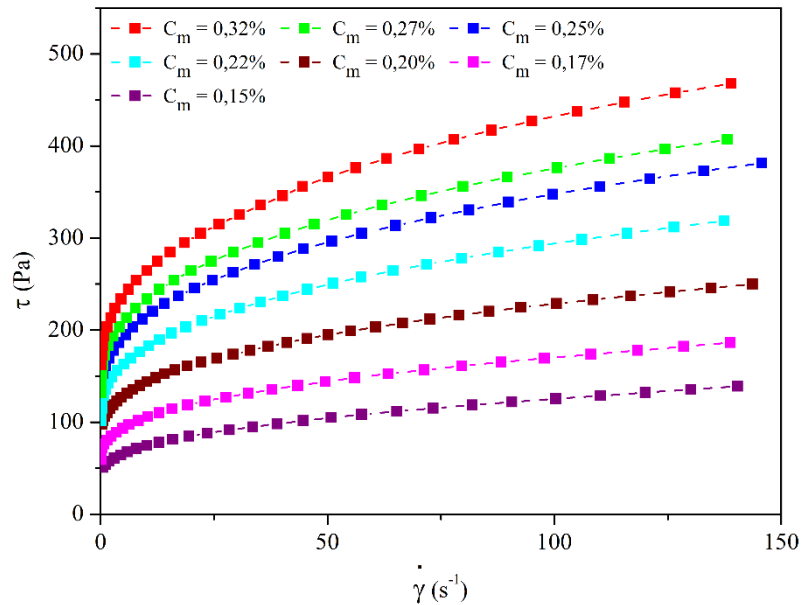
Fonte: Elaboração do próprio autor

5.2 COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MEDIDAS DE ABATIMENTO DOS MATERIAIS AVALIADOS

As Figuras de 19 a 24 apresentam o comportamento reológico dos géis de carbopol, lamas e argamassas analisadas neste trabalho. Obteve-se como melhor ajuste reológico os modelos de fluidos pseudoplásticos, do tipo Herschel-Bulkley para

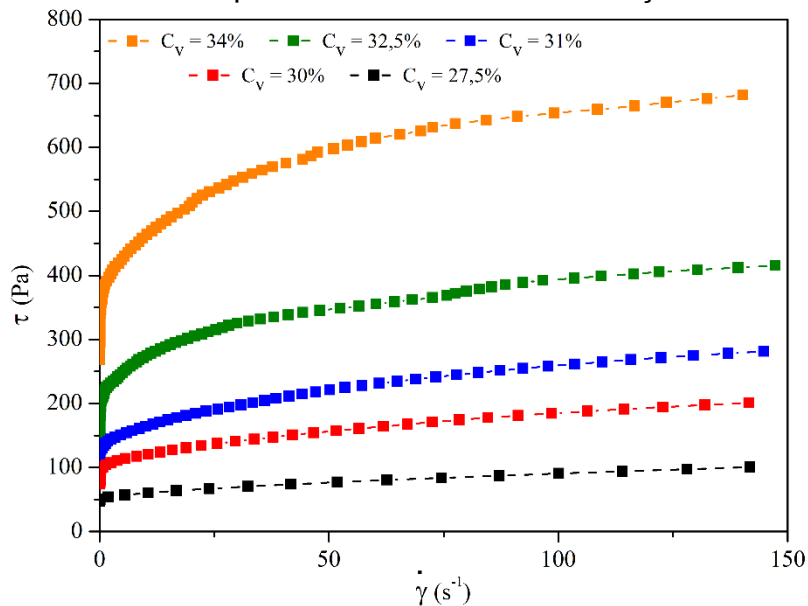
géis de carbopol, lamas e argamassa de menor consistência (maior relação água-cimento) e dilatante para as demais argamassas.

Figura 19 - Curvas de fluxo para as diferentes concentrações de géis de carbopol analisadas



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 20 - Curvas de fluxo para as diferentes concentrações de lamas analisadas

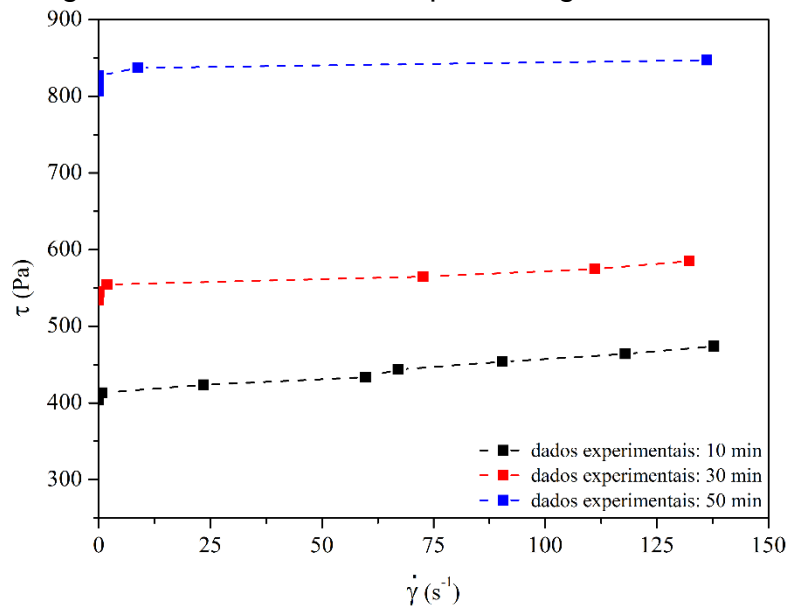


Fonte: Elaboração do próprio autor

A partir das curvas de fluxo apresentadas na Figura 19 e Figura 20 é possível observar o comportamento das concentrações de géis de carbopol e de lamas em

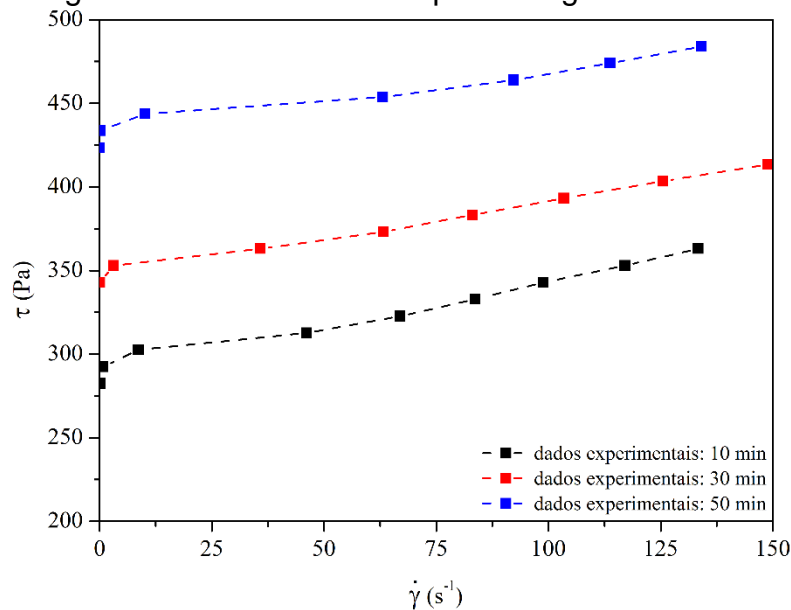
função da tensão limite de escoamento, de forma que o aumento das tensões limite de escoamento está associado ao aumento da concentração dos materiais analisados. Trabalhos como o de Pierre et al. (2013) e Pashias et al. (1996), que avaliam respectivamente, géis de carbopol e materiais mineralógicos, evidenciam a relação existente entre concentração e o aumento de tensão limite de escoamento, conforme observado neste trabalho.

Figura 21 - Curvas de fluxo para a argamassa ARG 1



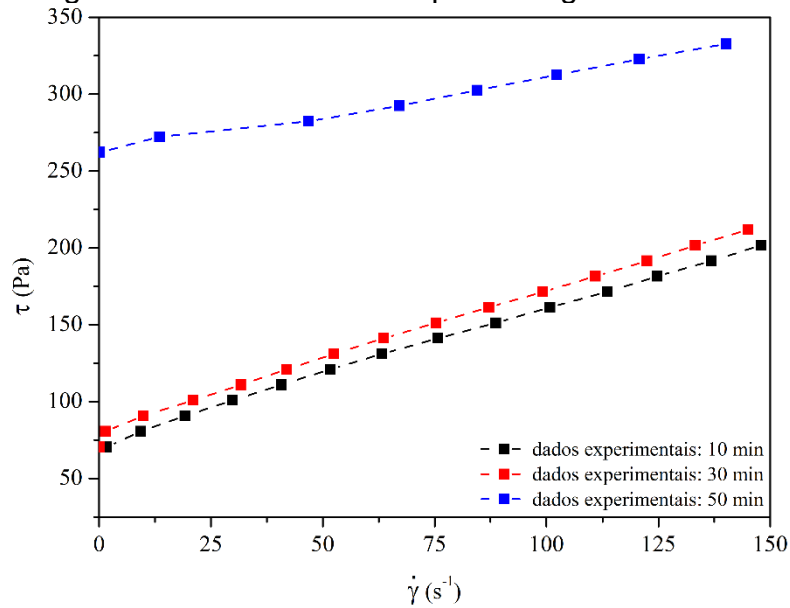
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 22 - Curvas de fluxo para a argamassa ARG 2



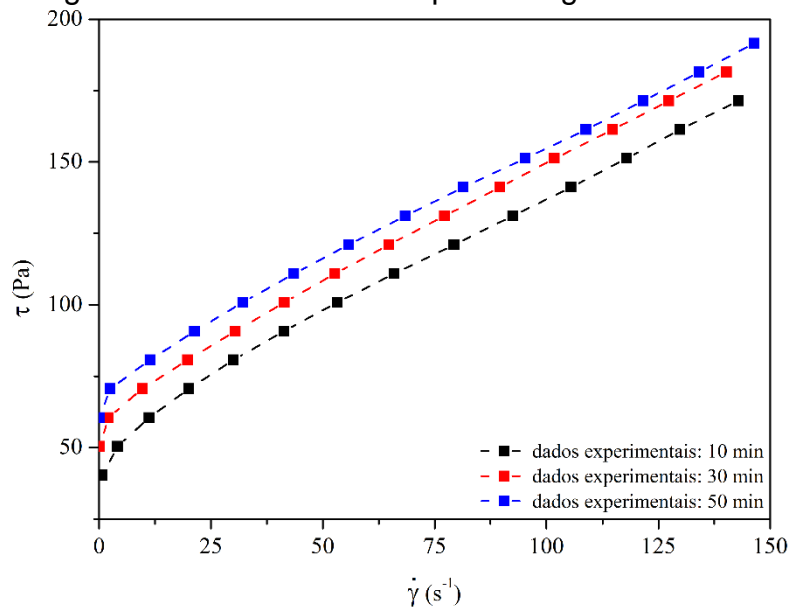
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 23 - Curvas de fluxo para a argamassa ARG 3



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 24 - Curvas de fluxo para a argamassa ARG 4



Fonte: Elaboração do próprio autor

Observa-se, a partir das Figuras 21, 22, 23 e 24, o aumento da tensão limite de escoamento das argamassas quando da diminuição da relação água-cimento, indicando maior consistência do material e, portanto, sua maior dificuldade em sofrer deformação. Ainda relacionado às argamassas, é possível observar o aumento da tensão limite de escoamento com o passar do tempo. Essa constatação indica o

aumento da consistência do material em função do processo de hidratação do cimento (RASSINEUX et al., 1989).

A caracterização reológica da argamassa ARG 1 (de menor relação água-cimento), apresentada na Figura 21, forneceu grandes variações em termos dos parâmetros reológicos, conforme pode ser visto nas Tabelas 11, 12 e 13. Esse fato, a ser discutido ainda neste tópico, provocou a exclusão da argamassa ARG 1 das análises realizadas no trabalho.

Já tendo sido comprovada a operacionalidade do aparato automatizado de *slump test*, os resultados apresentados neste tópico, referentes às medidas de abatimento, foram obtidos segundo o aparato desenvolvido. A Tabela 9 e Tabela 10 apresentam, respectivamente, os valores médios de abatimentos e de parâmetros reológicos, bem como seus respectivos desvios padrão, para os géis de carbopol e lamas.

Tabela 9 - Dados médios e desvios padrão de abatimentos e parâmetros reológicos dos géis de carbopol produzidos

Concentração (%)	Abatimento (mm)	Tensão limite de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s ⁿ)	Índice de escoamento (n)
0,15	257,23 ± 1,79	32,90 ± 3,75	12,41 ± 0,56	0,42 ± 0,01
0,17	242,86 ± 1,66	57,12 ± 2,97	15,35 ± 4,30	0,42 ± 0,05
0,20	237,82 ± 3,80	73,91 ± 3,19	28,78 ± 2,59	0,37 ± 0,01
0,22	226,38 ± 2,86	98,69 ± 4,529	35,22 ± 1,23	0,37 ± 1,23
0,25	218,87 ± 2,45	110,65 ± 5,61	42,87 ± 1,23	0,37 ± 0,01
0,27	213,11 ± 3,26	119,43 ± 4,98	45,64 ± 1,82	0,37 ± 0,01
0,32	206,19 ± 4,89	142,52 ± 5,63	51,41 ± 2,78	0,37 ± 0,01

Obs: valores médios referentes à realização de 10 ensaios por concentração

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 10 - Dados médios e desvios padrão de abatimentos e parâmetros reológicos das lamas produzidas

Concentração (%)	Abatimento (mm)	Tensão limite de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s ⁿ)	Índice de escoamento
27,50	263,05 ± 1,39	46,01 ± 0,91	3,02 ± 0,24	0,58 ± 0,01
30,00	244,99 ± 1,64	96,55 ± 6,77	7,46 ± 2,33	0,55 ± 0,06
31,00	237,07 ± 1,13	117,62 ± 2,08	15,81 ± 1,44	0,47 ± 0,01
32,25	222,70 ± 3,47	146,71 ± 12,17	74,52 ± 13,83	0,29 ± 0,03
34,00	176,58 ± 7,97	238,88 ± 16,95	115,85 ± 17,92	0,29 ± 0,04

Obs: valores médios referentes à realização de 8 ensaios por concentração

Fonte: Elaboração do próprio autor

A partir dos dados da Tabela 9 e Tabela 10, observa-se a relação entre os parâmetros tensão limite de escoamento e medida de abatimento, de forma que o aumento do primeiro conduziu à queda do segundo. Nota-se também o baixo desvio padrão dos dados de abatimento medidos no equipamento automatizado, comprovando sua capacidade em repetir de forma similar os ensaios. Além disso, observa-se o baixo desvio padrão dos parâmetros reológicos dos géis de carbopol e lamas, indicando o controle na realização das análises e a adequabilidade do equipamento de reometria às características de escoamento de tais fluidos.

A Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13 apresentam os resultados experimentais médios (medida de abatimento e caracterização reológica) das argamassas avaliadas, considerando os diferentes tempos de análise.

Tabela 11 - Dados médios e desvios padrão de abatimentos e parâmetros reológicos das argamassas produzidas para o tempo de 10 minutos

Composição	Abatimento (mm)	Tensão limite de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.sⁿ)	Índice de escoamento
ARG 1*	221,40 ± 3,81	407,04 ± 71,09	0,12 ± 0,16	1,41 ± 0,38
ARG 2	228,73 ± 3,71	272,12 ± 25,00	0,09 ± 0,09	1,39 ± 0,18
ARG 3	234,34 ± 2,30	74,33 ± 4,68	1,55 ± 0,20	0,89 ± 0,02
ARG 4	247,01 ± 5,63	45,62 ± 1,18	2,00 ± 0,15	0,82 ± 0,02

* Dados excluídos das análises devido à grande variabilidade de resultados

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 12 - Dados médios e desvios padrão de abatimentos e parâmetros reológicos das argamassas produzidas para o tempo de 30 minutos

Composição	Abatimento (mm)	Tensão limite de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.sⁿ)	Índice de escoamento
ARG 1*	186,69 ± 10,59	445,34 ± 95,06	0,09 ± 0,10	1,50 ± 0,39
ARG 2	217,84 ± 2,69	341,20 ± 26,21	0,11 ± 0,06	1,30 ± 0,11
ARG 3	227,20 ± 1,56	83,45 ± 11,63	1,58 ± 0,79	0,91 ± 0,09
ARG 4	242,26 ± 4,67	57,95 ± 1,18	1,73 ± 0,14	0,86 ± 0,00

* Dados excluídos das análises devido à grande variabilidade de resultados

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 13 - Dados médios e desvios padrão de abatimentos e parâmetros reológicos das argamassas produzidas para o tempo de 50 minutos

Composição	Abatimento (mm)	Tensão limite de escoamento (Pa)	Índice de consistência (Pa.s ⁿ)	Índice de escoamento
ARG 1*	156,99 ± 9,95	472,72 ± 399,20	1,97 ± 1,71	1,41 ± 1,45
ARG 2	197,01 ± 12,35	420,01 ± 32,30	0,03 ± 0,05	1,61 ± 0,26
ARG 3	221,39 ± 1,48	297,35 ± 27,18	0,07 ± 0,04	1,36 ± 0,13
ARG 4	235,82 ± 3,28	68,38 ± 3,28	1,92 ± 0,52	0,85 ± 0,52

* Dados excluídos das análises devido à grande variabilidade das medidas reológicas

Fonte: Elaboração do próprio autor

Entretanto, nota-se elevado desvio padrão das medidas reológicas das argamassas, especialmente da tensão limite de escoamento, quando da diminuição da relação água-cimento (maior desvio padrão na argamassa ARG 1) e do aumento do tempo de análise (maiores desvios padrão no tempo de 50 minutos). Esse comportamento demonstra a dificuldade do reômetro utilizado em analisar argamassas de maior consistência e com fenômenos de aglomeração e hidratação mais avançado, isto devido a uma limitação de torque do equipamento utilizado (MACIEL et al., 2016; ESTELLÉ et al., 2012). Esse fato, implicou na exclusão da análise dos dados da ARG 1.

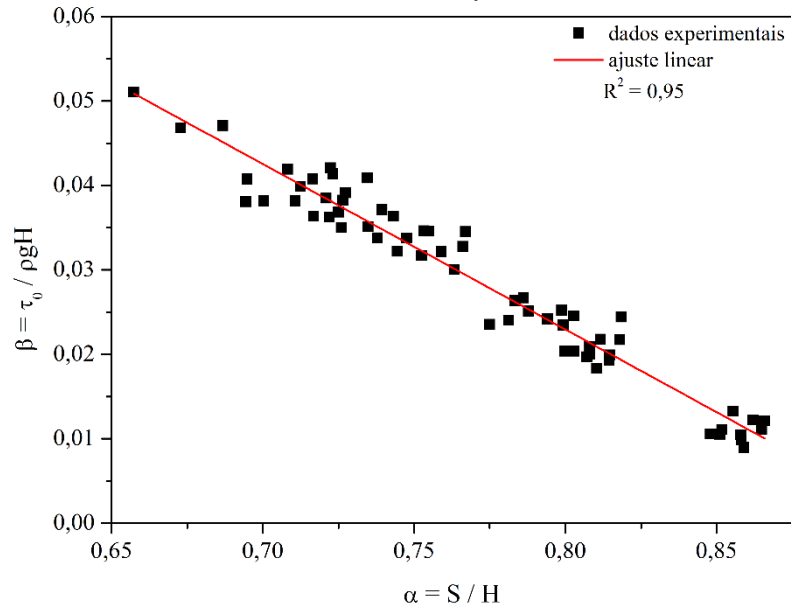
Os dados coletados na caracterização física e reológica de todos os materiais avaliados, bem como as medidas fornecidas pelo aparato automatizado de *slump test* são fornecidos no Apêndice B. Já as curvas características de descida de cada um dos materiais avaliados, obtidas a partir do aparato automatizado de *slump test*, são apresentadas no Apêndice C.

5.3 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO A PARTIR DA MEDIDA DE ABATIMENTO AUTOMATIZADA

Como já relatado em diferentes trabalhos da literatura, a medida de abatimento está intimamente ligada ao parâmetro tensão limite de escoamento. Sendo assim, a fim de relacionar o abatimento e a tensão limite de escoamento, para os diferentes materiais avaliados neste projeto, os parâmetros de interesse foram tratados em termos adimensionais, conforme desenvolvimento apresentado no tópico 4.5.1 desta dissertação, de forma a obter uma correlação entre S/H (sendo S a medida de abatimento e H a altura do cone de Abrams) e $\tau_0/\rho gH$ (sendo τ_0 a tensão limite de

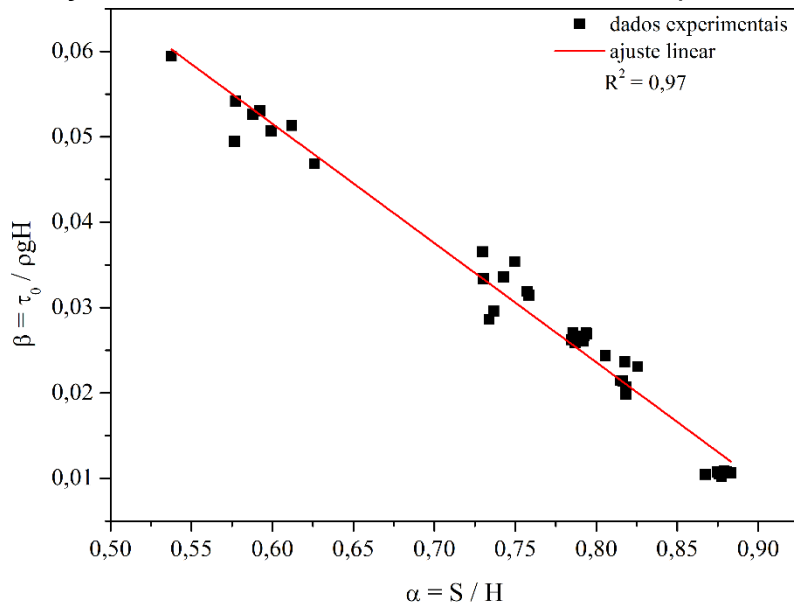
escoamento, ρ a massa específica do material analisado e g a aceleração da gravidade), conforme Figura 25, Figura 26 e Figura 27.

Figura 25 - Relação entre os adimensionais característicos para os dados dos géis de carbopol



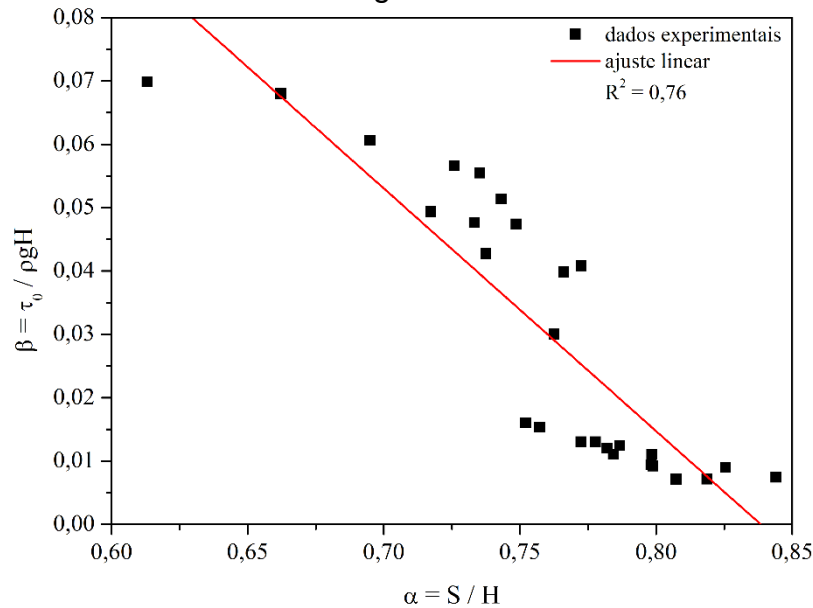
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 26 - Relação entre os adimensionais característicos para os dados das lammas



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 27 - Relação entre os adimensionais característicos para os dados das argamassas



Fonte: Elaboração do próprio autor

A partir da relação entre os adimensionais característicos plotados na Figura 25, Figura 26 e Figura 27, pôde-se obter um modelo empírico de correlação entre o abatimento e a tensão limite de escoamento, conforme Equação 34:

$$\beta(\alpha) = -A\alpha + B \quad (34)$$

sendo β igual $\tau_0/\rho g H$, α definido como s/H e, A e B , os coeficientes da função linear de ajuste.

Os modelos de correlação empírica, para todos os materiais avaliados, foram ajustados segundo funções lineares (Equação 34), sendo que para cada material os coeficientes da função linear de ajuste assumirão valores diferentes, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros das funções de correlação de abatimento e tensão limite de escoamento obtidas para géis de carbopol, lamas e argamassas

Material	A	B	R ²
Gel de Carbopol	0,20	0,18	0,95
Lama	0,14	0,14	0,97
Argamassa	0,38	0,32	0,76

Fonte: Elaboração do próprio autor

Os modelos empíricos obtidos apresentam uma relação linear entre os dois adimensionais analisados, esse comportamento já foi relatado na literatura e pode ser encontrado, por exemplo, nos trabalhos de Roussel (2006), Ferraris e De Larrard (1998) e Pierre et al. (2013). O alto ajuste dos modelos obtidos aos dados de géis de carbopol e lamas, coeficiente de determinação elevado (R^2 acima de 0,90), e argamassas ($R^2=0,76$), demonstra a boa capacidade dos modelos definidos em prever a tensão limite de escoamento de géis de carbopol, lamas e argamassas a partir da medida de abatimento, considerando um ajuste linear. Entretanto, é importante destacar que tais correlações apresentam faixas de validade de acordo com os abatimentos avaliados experimentalmente. Sendo assim, os géis de carbopol apresentam correlação válida para abatimentos na faixa de 200 a 250 mm, enquanto a correlação obtida para as lamas tem validade no intervalo de abatimento de 170 a 260 mm, já as argamassas apresentam correlação válida para abatimentos segundo a faixa 180 a 260 mm. A fim de validar os modelos empíricos obtidos, são realizadas, no Apêndice E, comparações de tensões limites de escoamento presentes em trabalhos da literatura com aquelas obtidas a partir de tais modelos.

É importante ressaltar que a faixa de abatimento avaliada neste trabalho teve como limitador o equipamento de reometria disponível, o qual, devido à limitação em termos de torque, impossibilitou a avaliação de materiais de menores medidas de abatimento. Ao mesmo tempo, o uso de materiais de elevada fluidez (sem limitação para avaliação no equipamento de reometria) inviabilizaria o uso do equipamento automatizado de *slump test*, pois tais materiais passariam a ter como medida de maior importância o espalhamento, medida essa ainda não avaliada no aparato.

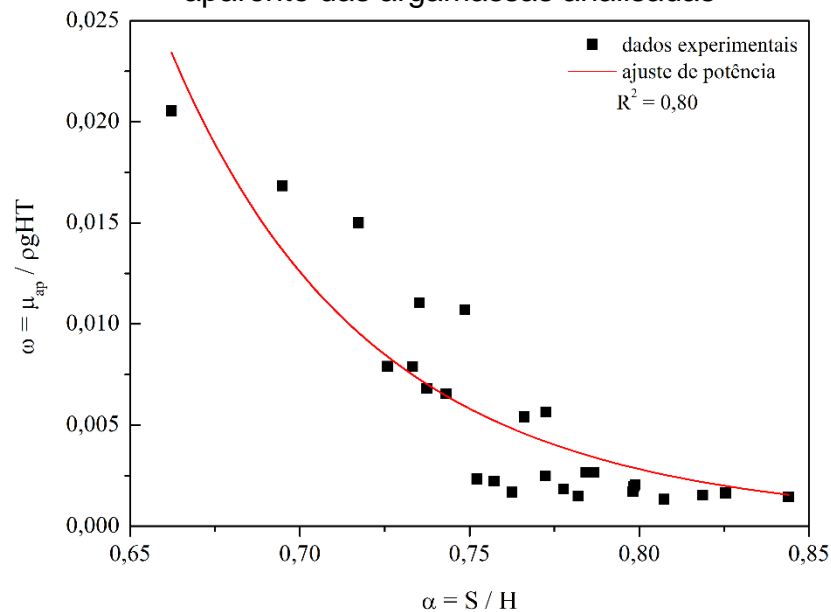
5.4 DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE A PARTIR DA MEDIDA DE ABATIMENTO AUTOMATIZADA: ESTUDO DE CASO DA ARGAMASSA

No contexto desta dissertação, propôs-se, a partir de uma análise dimensional, determinar grupos adimensionais, representativos do fenômeno envolvido no *slump test*, capazes, em uma primeira análise, de fornecer indicativos de viscosidade

aparente do material analisado. Tal análise foi realizada apenas para as argamassas, descartando-se a argamassa ARG 1 (motivo já mencionado no tópico 5.2).

Sendo assim, a fim de relacionar a medida de abatimento e o tempo para sua ocorrência à viscosidade aparente, utilizou-se os adimensionais obtidos no tópico 4.5.2, especificamente os adimensionais S/H e $\mu_{ap}/\rho gHT$, conforme Figura 28.

Figura 28 - Relação entre os adimensionais definidos para avaliação da viscosidade aparente das argamassas analisadas



Fonte: Elaboração do próprio autor

A partir da relação entre os adimensionais característicos (do fenômeno envolvido de *slump test*) plotados na Figura 28, pôde-se obter um modelo empírico de correlação das medidas de abatimento e tempo para ocorrer o abatimento com a viscosidade aparente da argamassa, tal modelo é apresentado na Equação 35:

$$\omega(\alpha) = C\alpha^{-D} \quad (35)$$

sendo α igual s/H , ω definido como $\mu_{ap}/\rho gST$ e, C e D , os coeficientes da função potência definida como ajuste.

Os coeficientes, da função de ajuste definida, são apresentados na Tabela 15.

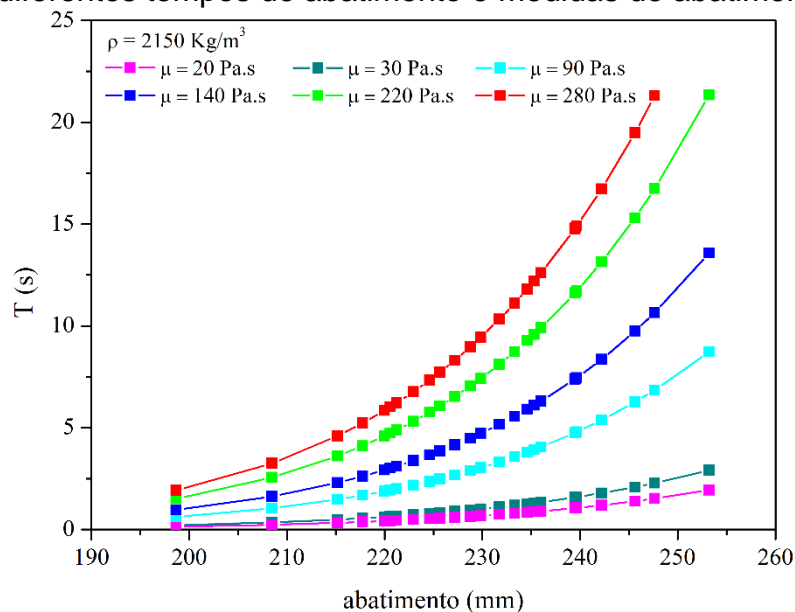
Tabela 15 - Parâmetros da função de correlação de abatimento e viscosidade aparente das argamassas

Material	C	D	R ²
Argamassa	$2,32 \times 10^{-4}$	11,89	0,80

Fonte: Elaboração do próprio autor

Sabendo que o tempo de abatimento é um parâmetro que se relaciona fortemente à viscosidade, pôde-se definir, a partir do modelo definido para obtenção da viscosidade aparente (Equação 35), o comportamento de tempo de abatimento frente às medidas de abatimento e de viscosidade aparente, considerando a massa específica média das argamassas analisadas. A Figura 29 ilustra o comportamento da viscosidade aparente segundo diferentes medidas e tempos de abatimento.

Figura 29 - Comportamento da viscosidade aparente das argamassas para diferentes tempos de abatimento e medidas de abatimento

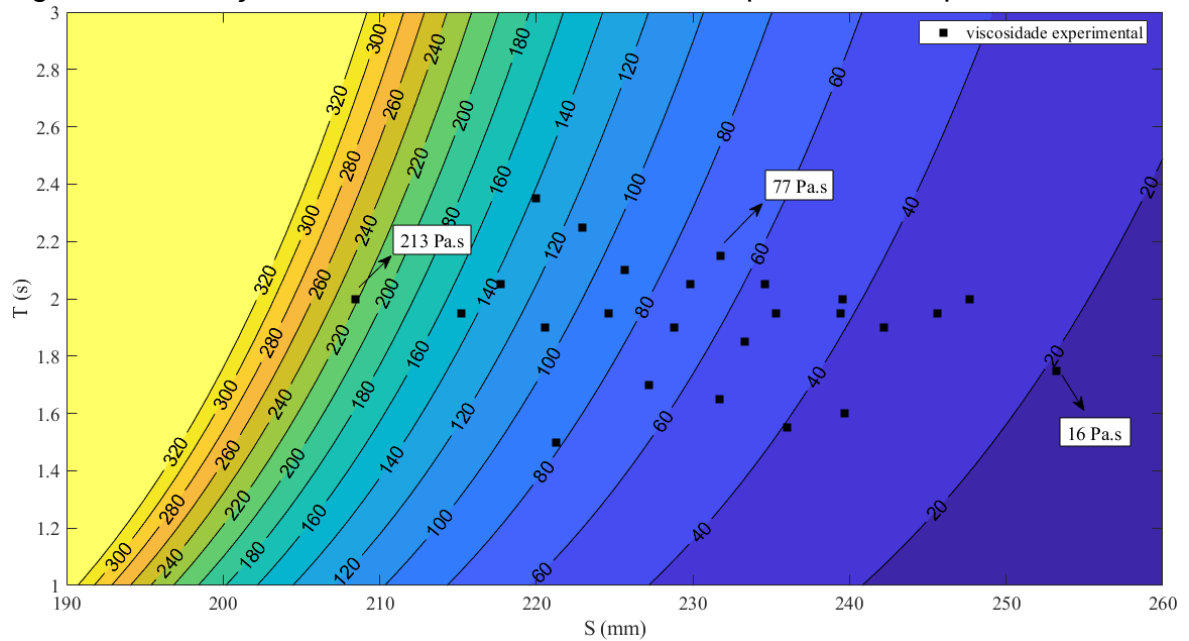


Fonte: Elaboração do próprio autor

A partir da Figura 28 e Figura 29 é possível observar o comportamento da viscosidade aparente das argamassas analisadas segundo as medidas de abatimento. Observa-se, a partir da Figura 30 (definição de uma curva que permite avaliar o comportamento de abatimento, viscosidade aparente e tempo de abatimento), que para um mesmo valor de abatimento, a viscosidade aparente aumenta à medida que o tempo para a ocorrência do abatimento aumenta, indicando a viscosidade como um efeito que retarda o tempo para o material atingir o abatimento.

Esse comportamento é relatado no trabalho de Chidiac et al. (2000), o qual avalia a viscosidade plástica de concretos convencionais, a partir da medida de abatimento e tempo para sua ocorrência.

Figura 30 - Relação entre abatimento, viscosidade aparente e tempo de abatimento



Fonte: Elaboração do próprio autor

A partir das medidas de abatimento e do tempo para sua ocorrência (medidas essas fornecidas pelo aparato automatizado de *slump test*) foi possível obter um modelo empírico que permite a obtenção da viscosidade aparente de argamassas convencionais. O coeficiente de determinação da função de ajuste ($R^2 = 0,80$) demonstra a boa capacidade do modelo definido em prever a viscosidade aparente a partir do aparato automatizado de *slump test*. Entretanto, é importante destacar que tal correlação é válida para abatimentos na faixa de 180 a 260 mm.

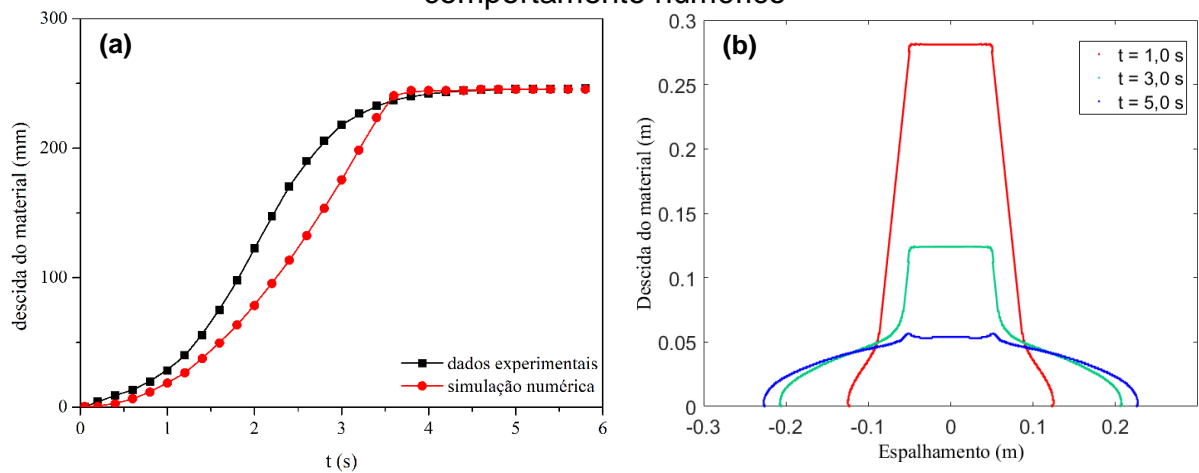
Uma complementação, para a obtenção do parâmetro viscosidade de argamassas, é proposta e apresentada no Apêndice D. Nessa análise um novo funcional de viscosidade é definido ao considerar, além da medida de abatimento e o tempo de abatimento, o valor de espalhamento do material.

5.5 CONFRONTO EXPERIMENTAL X SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação numérica do *slump test* foi realizada considerando apenas os materiais géis de carbopol e lamas. Os resultados da simulação numérica do *slump test* são apresentados em termos dos dados de descida do material em função do tempo (regime transiente), sendo suas validações realizadas por meio dos dados fornecidos pelo aparato automatizado de *slump test*.

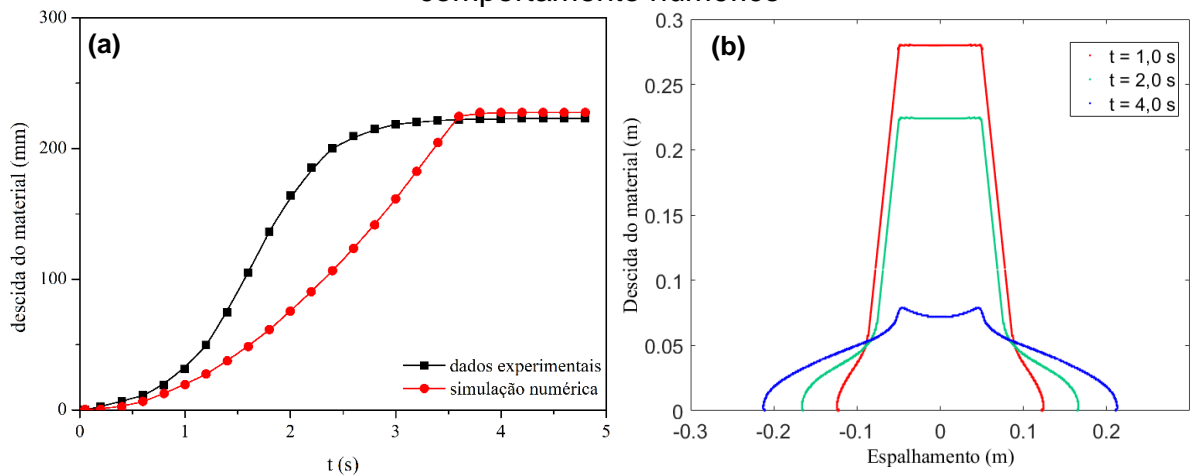
As Figuras de 31 a 36 ilustram os resultados das simulações numéricas de géis de carbopol e lamas frente aos resultados experimentais.

Figura 31 - Carbopol $C_m = 0,20\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico



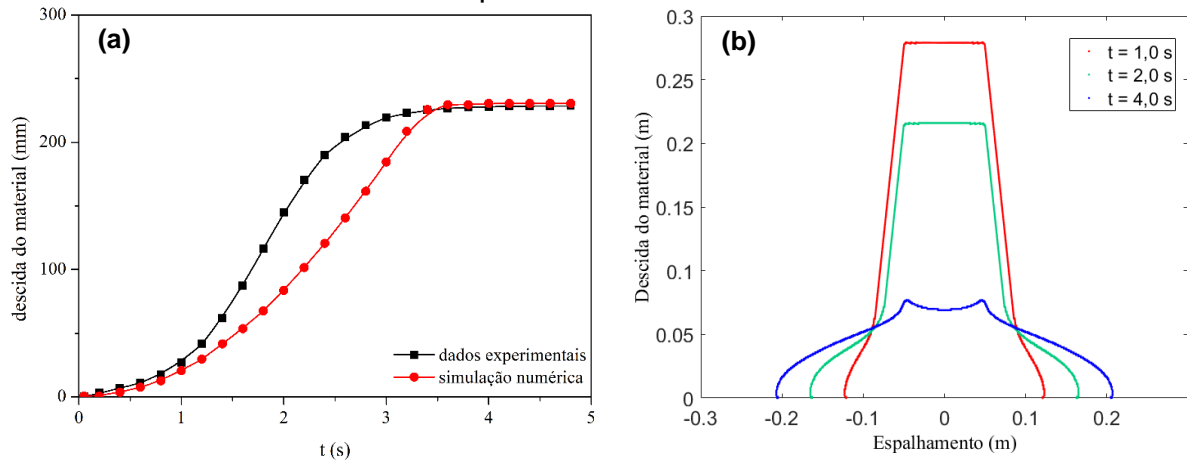
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 32 - Carbopol $C_m = 0,22\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico



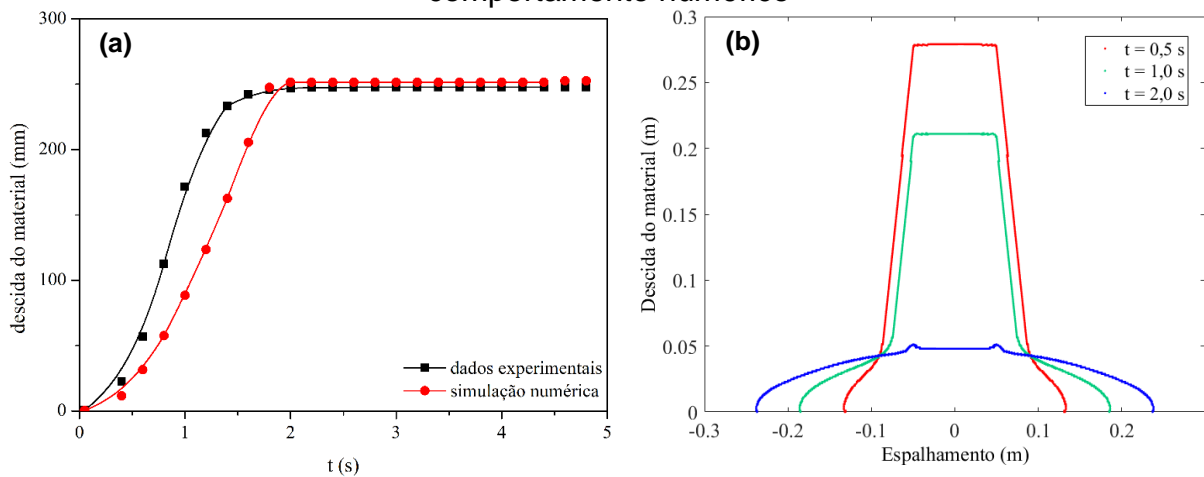
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 33 - Carbopol $C_m = 0,25\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico



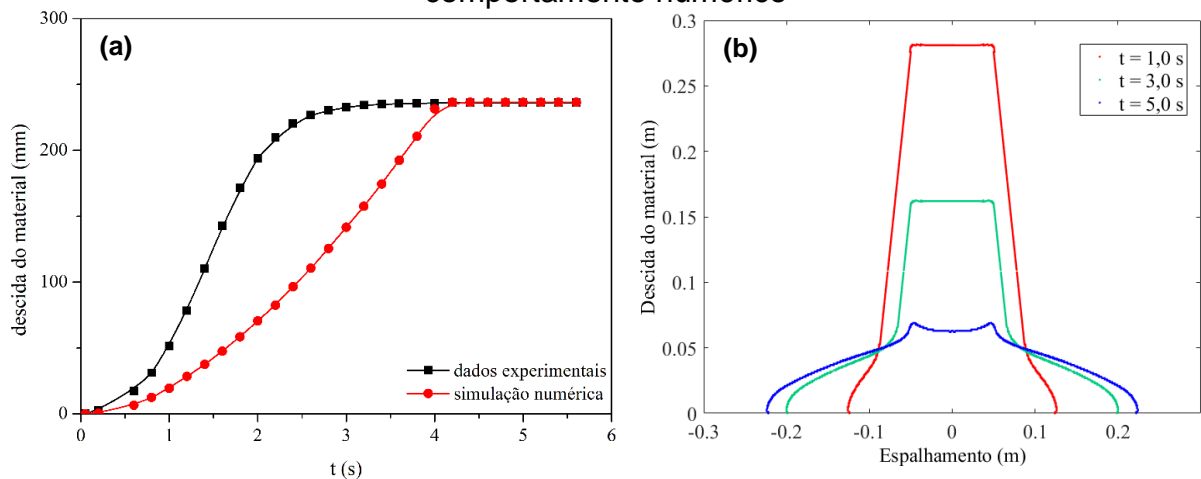
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 34 - Lama $C_v = 30,0\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico



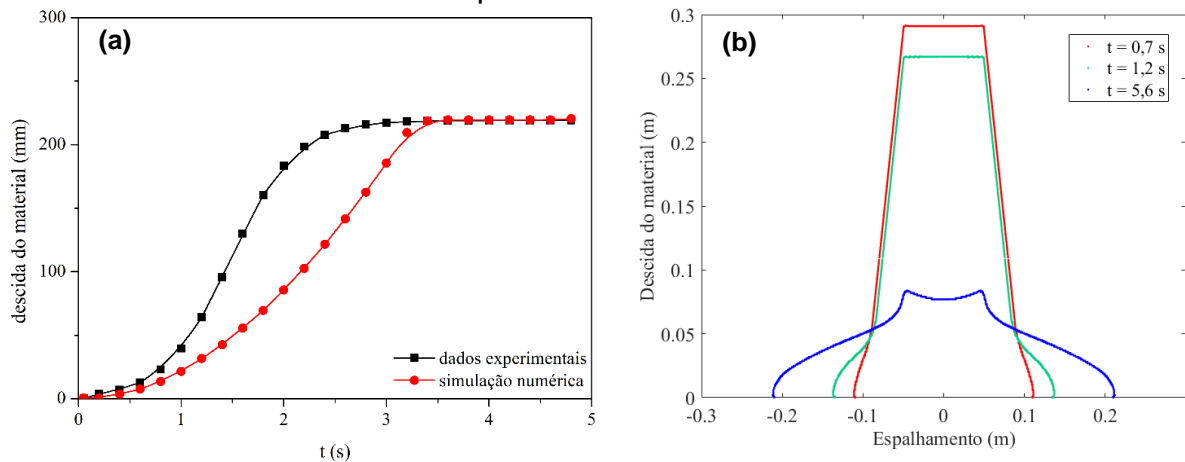
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 35 - Lama $C_v = 31,0\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico



Fonte: Elaboração do próprio autor

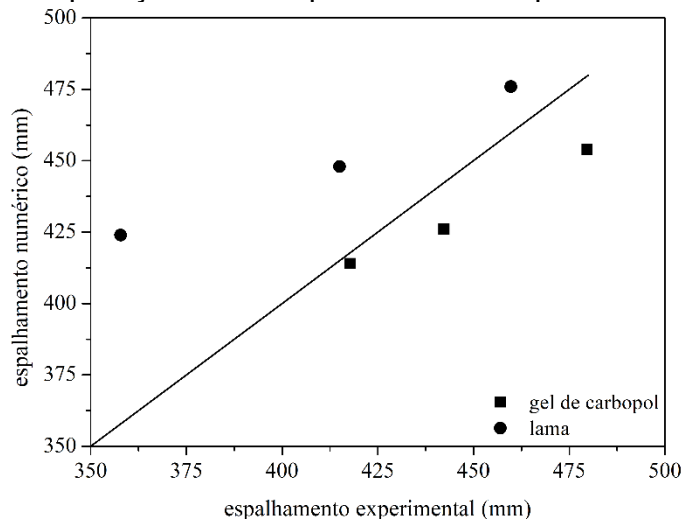
Figura 36 - Lama $C_v = 32,5\%$: (a) confronto numérico-experimental e (b) comportamento numérico



Fonte: Elaboração do próprio autor

A partir dos confrontos entre dados numéricos e experimentais, observa-se que o modelo numérico foi capaz de fornecer a medida de abatimento, de fluidos não-Newtonianos, e esta apresentou grande proximidade com a medida obtida experimentalmente (erro máximo da ordem de 2,1% para os géis de carbopol e 1,9% para as lamas). Assim, em termos de medida de abatimento, o modelo numérico apresenta-se capaz de bem simular o *slump test* para diferentes materiais (géis de carbopol e lamas). O modelo numérico também forneceu bons resultados para a avaliação do espalhamento, apresentando proximidade com os resultados medidos experimentalmente (sendo erro máximo de 8,8% para os géis de carbopol e 18,5% para as lamas), conforme pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 - Comparação entre espalhamentos experimentais e numéricos



Fonte: Elaboração do próprio autor

Entretanto, todos os resultados numéricos apresentaram diferença com relação aos dados experimentais quando da avaliação do comportamento de descida do material. Vale ressaltar que erros máximos de 67% para as lamas e 55% para os géis de carbopol foram identificados no regime transiente. Assim, conclui-se que para o modelo numérico desenvolvido, no qual não houve a implementação da subida do cone de Abrams (considerou-se apenas o rompimento instantâneo do molde que confina o material), é necessário a implementação desta velocidade de subida no código, pois, provavelmente, a condição de içamento do molde esteja influenciando no processo de descida do material, bem como os valores de espalhamento. Nesse sentido, Gao e Fourie (2015), em seu trabalho numérico, destacam que há influência do levantamento do molde do *slump test* (molde levantado com maior ou menor velocidade) no processo de descida do material, abatimento e espalhamento, principalmente para materiais de elevada fluidez, ainda que tal efeito seja controverso na literatura; Pashias et al. (1996) e Saak (2004) concluem que a velocidade de levantamento do molde não afeta a medida de abatimento.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho de mestrado, como relatado no primeiro capítulo desta dissertação, surge com o objetivo de fornecer um mecanismo de maior rigor para a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone, ensaio esse de ampla aplicação na construção civil como controle tecnológico de materiais cimentícios e com forte dependência do operador. Além disso, o mesmo possibilita caracterizações reológicas de materiais, seja pelo uso da medida de abatimento, seja pelas demais informações fornecidas pelo aparato desenvolvido. Ao mesmo tempo, tal ferramenta experimental torna-se disponível para validações de modelos numéricos do *slump test*.

6.1 APARATO AUTOMATIZADO DE SLUMP TEST

O aparato automatizado de *slump test* foi desenvolvido a fim de ser capaz de simular a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone, garantido o correto levantamento do cone de Abrams e leitura da medida de abatimento. A partir de um sistema de içamento, projetado para dar maior estabilidade ao levantamento do cone de Abrams, e de um sensor de medição a laser, a concepção, o desenvolvimento e a operacionalização do aparato automatizado foi bem-sucedida.

O comportamento de funcionamento do aparato automatizado de *slump test* apresentou solidez, tanto em relação ao sistema de suspensão quanto ao sistema de leitura de abatimento, mostrando-se capaz de bem avaliar diferentes tipos de materiais (testes realizados com géis de carbopol, lamas, argamassas e concretos).

A funcionalidade e operacionalidade do aparato foi avaliada segundo testes simultâneos a partir do aparato automatizado e do ensaio de abatimento de tronco de cone. Resultados similares em termos de abatimento foram obtidos, além disso, os resultados do aparato automatizado apresentaram menor dispersão de valores, demonstrando a sua boa capacidade de operação e redução da ação do operador no ensaio e leitura do abatimento, gerando, conseqüentemente, maior confiabilidade na medida de abatimento.

6.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS REOLÓGICOS A PARTIR DAS MEDIDAS OBTIDAS NO APARATO AUTOMATIZADO

No que diz respeito às correlações entre medidas fornecidas pelo aparato e parâmetros reológicos, foi possível a obtenção de correspondência entre medida de abatimento, tempo de abatimento, tensão limite de escoamento e viscosidade conforme relatado pela literatura.

Mesmo tendo limitações em termos de reometria, quando da avaliação de materiais de elevada consistência, que limitou a faixa de abatimento avaliada nesta dissertação, este trabalho obteve correlações entre a medida de abatimento e tensão limite de escoamento para géis de carbopol, lamas e argamassas. Assim, modelos lineares para obtenção do parâmetro tensão limite de escoamento foram definidos a partir do abatimento, segundo elevado ajuste experimental.

A relação entre a medida de abatimento e tensão limite de escoamento é de ampla aplicação, entretanto quando da avaliação da relação entre o abatimento e viscosidade aparente, analisada neste mestrado, maiores dificuldades foram encontradas. Um adimensional de viscosidade foi definido para obter uma relação entre a viscosidade aparente, o abatimento e o tempo de abatimento (medida fornecida pelo aparato).

O modelo obtido para a avaliação da viscosidade aparente mostrou-se coerente com modelos apresentados na literatura, além de apresentar bom ajuste experimental. Além disso, tal modelo permite estabelecer as fortes relações existentes entre abatimento, tempo de abatimento e viscosidade aparente.

6.3 MODELAGEM NUMÉRICA

Em termos de modelagem numérica do *slump test*, esta dissertação apresenta alguns resultados numéricos considerando géis de carbopol e lamas. A validação dos resultados numéricos foi realizada por meio do aparato automatizado de *slump test*, obtendo bons resultados.

Assim, o modelo numérico desenvolvido, considerando reologia complexa (fluido do tipo Herschel-Bulkley), mostrou-se capaz de simular o ensaio de abatimento de tronco de cone, principalmente em termos do valor de abatimento (resultado similar

aos medidos experimentalmente), entretanto o comportamento da amostra deformada apresentou algumas diferenças frente ao comportamento experimental relatado.

Dessa forma, deve-se desenvolver a capacidade do modelo numérico em controlar o levantamento do cone de Abrams. Tal comportamento não foi implementado na simulação numérica, e segundo indica os resultados de comparação numérico x experimental, e também trabalhos disponíveis na literatura, a velocidade de levantamento do cone de Abrams pode influenciar no comportamento da amostra deformada, de forma que deve-se avaliar o quão representativo é esse efeito no modelo numérico.

6.4 PERSPECTIVAS

Sendo o aparato automatizado de *slump test* operacional e sabendo de suas capacidades em termos de fornecimento de medidas e realização controlada dos ensaios, pode-se complementar sua capacidade de avaliação de materiais cimentícios; aperfeiçoar a modelagem numérica do *slump test*, validando-a por meio do aparato automatizado; e avaliar os diferentes efeitos de ensaio sobre as medidas fornecidas pelo aparato.

6.4.1 Melhorias no sistema de medição

Um passo importante a ser realizado para complementar a capacidade de avaliação do aparato automatizado de *slump test* é o desenvolvimento de mecanismos para avaliar o comportamento de espalhamento do material durante o *slump test*. Com isso, o aparato poderá fornecer informações de abatimento e espalhamento, aumentando sua capacidade em termos de instrumento de controle de qualidade de materiais cimentícios.

O uso de câmeras dispostas frontalmente ao aparato automatizado pode ser visto como uma forma de avaliar o espalhamento do material, entretanto deve-se atentar para o uso de instrumento de filmagem de elevada resolução e com pouca distorção de imagem. Alterações em termos de cores do fundo do aparato e também de sua base devem ser realizadas para permitir a correta análise das imagens a serem captadas pelas câmeras.

6.4.2 Simulação numérica

Como descrito nesta dissertação, a simulação numérica do *slump test* mostrou-se capaz de avaliar o comportamento real do material durante o ensaio, entretanto o não controle da velocidade de levantamento do cone de Abrams no modelo numérico implicou em diferenças em termos da amostra deformada quando da comparação numérica x experimental.

Frente a isso, a simulação numérica do *slump test* deve ter continuidade em seu desenvolvimento, focando a implementação da velocidade de levantamento do cone Abrams. Assim, poderá ser definido, numericamente, o quanto a velocidade de levantamento do cone de Abrams é capaz de alterar os resultados do *slump test*.

6.4.3 Estudo sobre fatores de influência da medida de abatimento

Como forma de complementar as informações existentes na literatura acerca dos parâmetros que podem influenciar o comportamento da amostra durante o *slump test*, o aparato automatizado pode ser utilizado para verificar diferentes condições de ensaios.

Assim, tornar-se-á possível avaliar fatores como, por exemplo, o comportamento da velocidade de levantamento do cone de Abrams, de forma a melhorar o entendimento acerca do *slump test*, além de complementar as informações acerca dos procedimentos para sua realização.

6.4.4 Análises complementares

Este trabalho de mestrado avaliou, por meio do aparato automatizado de *slump test*, diferentes materiais: gel de carbopol, lamas, argamassas e concretos. Entretanto, as análises numéricas e de definição da viscosidade aparente não foram realizadas para todos os materiais.

Assim, uma análise exploratória e mais ampla dos dados já obtidos deve ser realizada, a fim de estabelecer para todos os materiais avaliados os modelos de viscosidade aparente e de modelagem numérica, aumentando, dessa forma, o banco de dados e as análises experimentais e numéricas dos materiais avaliados.

6.4.5 Complementação da avaliação de materiais cimentícios

Complementar a análise de materiais cimentícios a partir do aparato automatizado de *slump test*, definindo faixas mais amplas de abatimento e uso de diferentes composições de concretos e argamassas, desde traços convencionais até aqueles com adições químicas e minerais.

Além disso, as medidas de abatimento desses materiais cimentícios podem ser obtidas, simultaneamente ao aparato automatizado, a partir do ensaio de abatimento de tronco de cone por diferentes operadores, de forma a mensurar o real efeito da ação do operador no ensaio padronizado e, conseqüentemente, no valor do abatimento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15900**: água para amassamento do concreto: requisitos. Rio de Janeiro, 2009. 11 p.

_____. **NBR 16605**: cimento portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 4 p.

_____. **NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

AZIMI, A.H. Analysis of slump test for sand-foam mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 29, n. 9, p. 04017109, 2017.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An introduction to rheology**. Amsterdam: Elsevier, 1989. 200 p.

BARTOS P. J. M.; SONEBI, M.; TAMIMI, A. K. **Workability and rheology of fresh concrete**: compendium of tests. Cachan: RILEM, 2002. Report of RILEM Technical Committee TC 145-WSM, Workability of Special Concrete Mixes.

BAUDEZ, J. C.; CHABOT F.; COUSSOT P. Rheological interpretation of the slump test. **Applied Rheology**, Zürich, v. 12, n. 3, p. 133-141, 2002.

BAUER, E. **Revestimentos de argamassas: características e peculiaridades**. Brasília, DF: Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, 2006. 59 p.

BOGER, D. V. Rheology of slurries and environmental impacts in the mining industry. **Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering**, Palo Alto, v. 4, p. 239-257, 2013.

BOGER, D. V. Rheology and the resource industries. **Chemical Engineering Science**, Amsterdam, v. 64, n. 22, p. 4525-4536, 2009.

BOUVET, A; GHORBEL, E; BENNACER, R. The mini-conical slump flow test: analysis and numerical study. **Cement and Concrete Research**, Amsterdam, v. 40, n. 10, p. 1517-1523, 2010.

BOUZIANI, T.; BENMOUNAH, A. Correlation between v-funnel and mini-slump test results with viscosity. **KSCE Journal of Civil Engineering**, Berlim, v. 17, n. 1, p. 173-178, 2013.

BRETAS, R.; D'AVILA, M. A. **Reologia de polímeros fundidos**. São Carlos: EdUFScar, 2000. 196 p.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 303 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CHENG, D. C. H. Yield stress: a time-dependent property and how to measure it. **Rheologica Acta**, Berlim, v. 25, n. 5, p. 542-554, 1986.

CHIDIAC, S. E. et al. Controlling the quality of fresh concrete: a new approach. **Magazine of Concrete Research**, Londres, v. 52, n. 5, p. 353-364, 2000.

CHIDIAC, S. E.; MAHMOODZADEH, F. Plastic viscosity of fresh concrete; a critical review of predictions methods. **Cement and Concrete Composites**, Amsterdam, v. 31, n. 8, p. 535-544, 2009.

CHOI, M. S. et al. Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 106, p. 632-639, 2016.

CHRISTENSEN, G. **Modelling the flow of fresh concrete: the slump test**. 1991. 171 f. Tese (Doutorado) - Faculty of Princeton University, Princeton University, Princeton, 1991.

CLAYTON, S.; GRICE, T. G.; BOGER, D. V. Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**, Amsterdam, v. 70, n. 1-4, p. 3-21, 2003.

COUSSOT, P. Yield stress fluid flows: a review of experimental data. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, Amsterdam, v. 211, p. 31-49, 2014.

D'AVILA, M. A.; BRETAS, R. E. S. **Reologia de polímeros fundidos**. 2. ed. São Carlos: Editora UFSCar, 2005. 257 p.

DE CAMPOS, T. M. P.; GALINDO, M. S. V. Evaluation of the viscosity of tropical soils for debris flow analysis: a new approach. **Géotechnique**, Londres, v. 66, n. 7, p. 533-545, 2016.

DE LARRARD, F.; FERRARIS, C. F.; SEDRAN, T. Fresh concrete: a herschel-bulkley material. **Materials and Structures**, Berlim, v. 31, n. 7, p. 494-498, 1998.

DIAS, N. **Determinação de propriedades reológicas de rejeito de mineração por meio de reômetro rotacional**. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

DINKGREVE, M. et al. On different ways of measuring the yield stress. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, Amsterdam, v. 238, p. 233-241, 2016.

DORAISWAMY, D. The origins of rheology: a short historical excursion. **Rheology Bulletin**, Nova York, v. 71, p. 1-9, 2002.

ESTELLE, P.; LANOS, C. High torque vane rheometer for concrete: principle and validation from rheological measurements. **Applied Rheology**, Zürich, v. 22, p. 12881, 2012.

FERRARIS, C. F.; De LARRARD, F. **Testing and modeling of fresh concrete rheology**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1998. 71 p.

FIOROT, G. H. **Mitigação de riscos e catástrofes naturais: análise numérico-experimental de roll waves evoluindo em canais inclinados**. 2012. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

FLUENT 14.5. user's guide. Lebanon: Fluent Incorporated, 2012. 2546 p.

GAO, J.; FOURIE, A. Spread is better: an investigation of the mini-slump test. **Minerals Engineering**, Amsterdam, v. 71, p. 120-132, 2015.

GARCIA-BERNET, D. et al. Rapid measurement of the yield stress of anaerobically-digested solid waste using slump tests. **Waste management**, Amsterdam, v. 31, n. 4, p. 631-635, 2011.

GEYER, A. L. B.; SÁ, R. R. Importância do controle de qualidade do concreto no estado fresco. **Informativo Técnico Realmix**, Goiânia, 2006. p. 8.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D. Rheological lab testing of building formulations. In: CONCHEM INTERNATIONAL EXHIBITION & CONFERENCE, 1994, Düsseldorf: Verlag Ziolkowsky. 1994.

GUTIERREZ, L.; PAWLIK, M. Observations on the yielding behaviour of oil sand slurries under vane and slump tests. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Nova Jersey, v. 93, n. 8, p. 1392-1402, 2015.

HACKLEY, V. A.; FERRARIS, C. F. **Guide to rheological nomenclature: measurements in ceramic particulate systems**: NIS special publication 946. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2001. 31 p.

IRGENS, F. **Continuum mechanics**. Berlim: Springer, 2008. 624 p.

KLEIN, B. **Rheology and stability magnetite dense media**. 1992. 457 f. Tese (Doutorado) – Faculty of Graduate Studies, University of British Columbia, Canadá, 1992, 457 p.

KUROKAWA, Y. et al. A study on the slump test and slump: flow test of fresh concrete. **Transactions of the Japan Concrete Institute**, Tokyo, v. 16, p. 25-32, 1994.

LONG, W. J. et al. Rheological approach in proportioning and evaluating prestressed self-consolidating concrete. **Cement and Concrete Composites**, Amsterdam, v. 82, p. 105-116, 2017.

MACHADO, N. C. **Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação**. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MACIEL, G. F.; BARBOSA, M. P.; PEREIRA, J. B. Comparative analysis of yield stress of mortars by Pashias technique and rotational rheometry. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 866-879, 2016.

MACIEL, G. F. et al. Experimental apparatus for roll wave measurements and comparison with a 1D mathematical model. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 11, p. 100-130, 2017.

MALKIN, A. Y. **Rheology: concepts, methods and applications**. 2. ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2012. 474 p.

MINUSSI, R. B. **Rompimento de barreiras: análise experimental e numérica na previsão de velocidades de propagação de frentes de material hiperconcentrado**. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

MIZANI, S.; SIMMS, P. Method-dependent variation of yield stress in a thickened gold tailings explained using a structure based viscosity model. **Minerals Engineering**, Amsterdam, v. 98, p. 40-48, 2016.

MURATA, J. Flow and deformation of fresh concrete. **Materials and Structures**, Berlim, v. 17, n. 98, p. 117-129, 1984.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

OLIVEIRA, I. R. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195 p.

PASHIAS, N. et al. A fifty cent rheometer for yield stress measurement. **Journal of Rheology**, Maryland, v. 40, n. 6, p. 1179-1189, 1996.

PEREIRA, J. B.; MACIEL, G. F.; BARBOSA, M. P. **Desenvolvimento e implementação de aparato mecânico para a medida automatizada do slump de concretos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 2016, Belo Horizonte. Anais do 58 Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: Ibracon, 2016. v. 1. p. 1-16.

PIERRE, A.; LANOS, C.; ESTELLÉ, P. Extension of spread-slump formulae for yield stress evaluation. **Applied Rheology**, Zürich, v. 23, n. 6, p. 63849, 2013.

Popovics, S. **Fundamentals of portland cement concrete: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1982. v.1, 1982.

RASSINEUX, F.; PETIT, J. C.; MEUNIER, A. Ancient analogues of modern cement: calcium hydrosilicates in mortars and concretes from gallo-roman thermal baths of western france. **Journal of the American Ceramic Society**, Nova Jersey, v. 72, n. 6, p. 1026-1032, 1989.

REIS, J. F. A. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado: estudo de caso.** 2008. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

RIBEIRO, V. Q. F. **Proposta de metodologia para avaliação do efeito de rupturas de estruturas de contenção de rejeitos.** 2015. 267 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

ROUSSEL, N. Correlation between yield stress and slump: comparison between numerical simulations and concrete rheometers results. **Materials and Structures**, Berlim, v. 39, n. 4, p. 501-509, 2006.

ROUSSEL, N.; COUSSOT, P. Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: From slump to spreading flow. **Journal of Rheology**, Maryland, v. 49, n. 3, p. 705-718, 2005.

SANTOS, F. L. **Estudo teórico-experimental em via de determinação de lei de atrito em escoamentos de fluidos hiperconcentrados.** 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

SCARPINI, L. A. T. **Investigação reológica do parâmetro tensão crítica de compósitos não-newtonianos através da técnica de Pashias e reometria convencional.** 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012. 1CD-ROM.

SCHOWALTER, W. R.; CHRISTENSEN, G. Toward a rationalization of the slump test for fresh concrete: comparisons of calculations and experiments. **Journal of Rheology**, Maryland, v. 42, n. 4, p. 865-870, 1998.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos.** São Paulo: Artliber, 2006. p. 234.

SHIROMA, P. H. **Estudo do comportamento reológico de suspensões aquosas de bentonita e CMC: influência da concentração do NaCl.** 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2012.

STARON, L. et al. Scaling laws for the slumping of a Bingham plastic fluid. **Journal of Rheology**, Maryland, v. 57, n. 4, p. 1265-1280, 2013.

SUN, A.; GUNASEKARAN, S. Yield stress in foods: measurements and applications. **International Journal of Food Properties**. Milton Park, v. 12, n. 1, p. 70-101, 2009.

TANIGAWA, Y.; MORI, H. Analytical study on deformation of fresh concrete. **Journal of Engineering Mechanics**, Reston, v. 115, n. 3, p. 493-508, 1989.

TANNER, R. I. **Engineering rheology**. 2. ed. New York: Oxford University, 2000. 559 p.

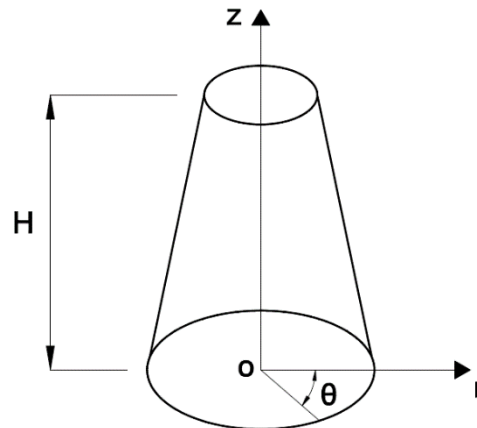
VIDAL, J.R.M.B. **Estudo reológico do suco de manga - efeito dos sólidos insolúveis**. 1997, 81 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

LYKLEMA, H. **Fundamentals of interface and colloid Science**. Amsterdam: Elsevier, v. 4, 2005. p. 692.

APÊNDICE A - PROPOSTA DE MODELAGEM E LEITURAS INTERPRETATIVAS À LUZ DOS EXPERIMENTOS

De acordo com as características de materiais com tensão limite de escoamento, diferentes regimes podem bem representar o seu comportamento em escoamento. Em consonância com a literatura (MURATA, 1984; PASHIAS, 1996; CLAYTON et al., 2003; ROUSSEL e COUSSOT, 2005; PIERRE et al., 2013), pode-se descrever o escoamento em coordenadas cilíndricas (O, r, θ, z) , conforme ilustrado na Figura A.1. A condição de geometria axissimétrica possibilita prescrever que $V_\theta = 0$ e, por conseguinte, que todas as variáveis são independentes de θ ($\partial/\partial\theta = 0$).

Figura A.1 - Geometria cilíndrica do cone de Abrams



Fonte: Elaboração do próprio autor

Considerando fluidos não-Newtonianos, o tensor de tensões é representado pela Equação A.1.

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \frac{\tau_0}{\sqrt{-D_{II}}} D_{ij} + F(\sqrt{-D_{II}}) D_{ij} \quad (\text{A.1})$$

sendo $p\delta_{ij}$ a parcela esférica do tensor de tensões, associada à pressão, τ_{ij} a parcela desviadora do tensor de tensões, τ_0 a tensão limite de escoamento, \bar{D} o tensor taxa de deformação, D_{II} o segundo invariante do tensor taxa de deformação e F a função contínua positiva que tende para zero quando D_{II} tende para zero.

Considerando fluido de comportamento Herschel-Bulkley (géis de carbopol, lamas e argamassas analisadas neste trabalho), o tensor de tensões é representado pela Equação A.2.

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \frac{\tau_0}{\sqrt{-D_{II}}} D_{ij} + \frac{2^n K_n}{(\sqrt{-D_{II}})^{1-n}} \quad (\text{A.2})$$

sendo n o índice de escoamento e K_n o índice de consistência.

E o tensor de taxas de deformação é escrito conforme Equação A.3.

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_r}{\partial r} & 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \\ 0 & \frac{V_r}{r} & 0 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) & 0 & \frac{\partial V_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Assim posto, o escoamento do material no *slump test* pode ser analisado segundo três regimes, sendo que cada regime apresenta um modelo analítico de obtenção da tensão limite de escoamento, o qual é definido a partir dos efeitos dominantes em cada situação. A seguir são apresentados cada um dos regimes de escoamento, os regimes de abatimento e espalhamento descritos por Roussel e Coussot (2005), e o intermediário desenvolvido por Pierre et al. (2013).

- Regime elongacional (abatimento): neste regime, o material apresenta pequenos valores de abatimento. Neste caso, as variações radiais do campo de velocidade são negligenciadas por serem menores quando comparadas às da direção vertical ($\partial/\partial z \gg \partial/\partial r$), de forma que o escoamento se desenvolve preferencialmente na vertical, sob a atuação de uma tensão resultante do próprio peso do material. A partir da Equação 39, tendo a pressão como resultado do peso do material e usando o critério de deformação de von Mises, a tensão limite de escoamento pode ser obtida a partir da Equação A.4.

$$\tau_0 = \frac{\rho gh}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.4})$$

sendo ρ a massa específica do material, g a aceleração da gravidade e h a altura da amostra, cessado o escoamento, no ponto central ($r = 0$).

- Regime de espalhamento: neste regime, o escoamento se desenvolve quase na sua totalidade por meio de espalhamento, com velocidade radial muito maior que a velocidade vertical ($V_r \gg V_z$). Em função disso, o efeito de inércia pode ser negligenciado, considerando como significativo somente a componente tangencial de tensão (τ_{rz}). Dessa forma, a tensão limite de escoamento, para a situação dominante de espalhamento, é dada segundo a Equação A.5.

$$h = \left(\frac{2\tau_0 R}{\rho g} \right)^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

ou ainda:

$$\tau_0 = \frac{225\rho g V_0^2}{128\pi^2 R^5} \quad (\text{A.6})$$

sendo V_0 o volume do material escoado e R o raio da amostra na altura $h = 0$.

- Regime intermediário: em casos em que podem ser vistos dois comportamentos do material escoado (mesma ordem de grandeza das taxas de deformação na direção vertical e radial), pode-se combinar os efeitos puramente alongacionais (Equação A.5) e de espalhamento (Equação A.6), de forma a obter a Equação A.7, a qual permite o cálculo da tensão limite de escoamento (PIERRE et al., 2013).

$$h = \frac{\sqrt{3}\tau_0}{\rho g} + \sqrt{\frac{2\tau_0}{\rho g}} (R - R_0)^{1/2} \quad (\text{A.7})$$

sendo R_0 o raio da amostra na altura h .

Assim, este tópico busca comparar os dados experimentais frente aos regimes de escoamento. Para isso, os três regimes apresentados - alongacional, de

espalhamento descritos por Roussel e Coussot (2005) e o intermediário definido por Pierre et al. (2013) - são comparados nas Figuras A.2, A.3 e A.4.

Figura A.2 - Adimensionais de abatimento e tensão limite de escoamento e seus regimes de escoamento para géis de carbopol

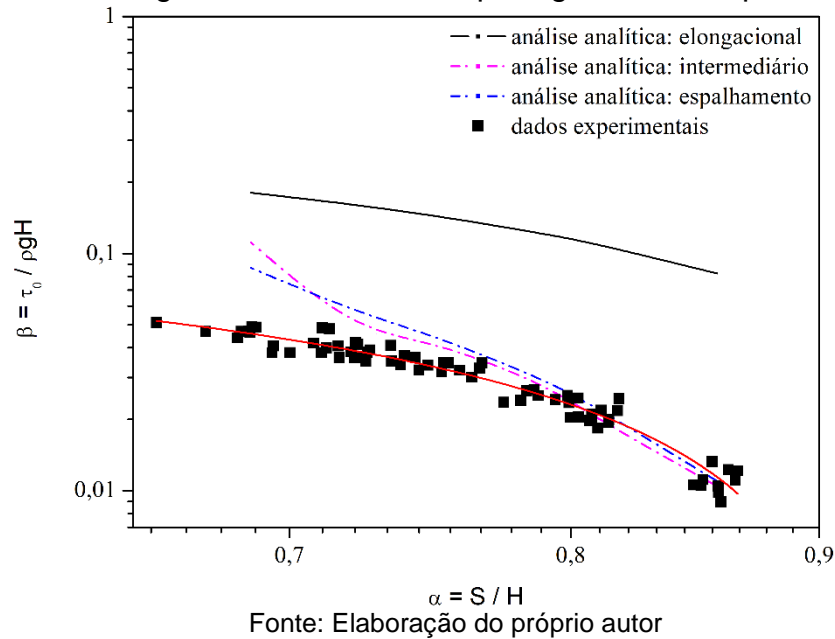


Figura A.3 - Adimensionais de abatimento e tensão limite de escoamento e seus regimes de escoamento para lammas

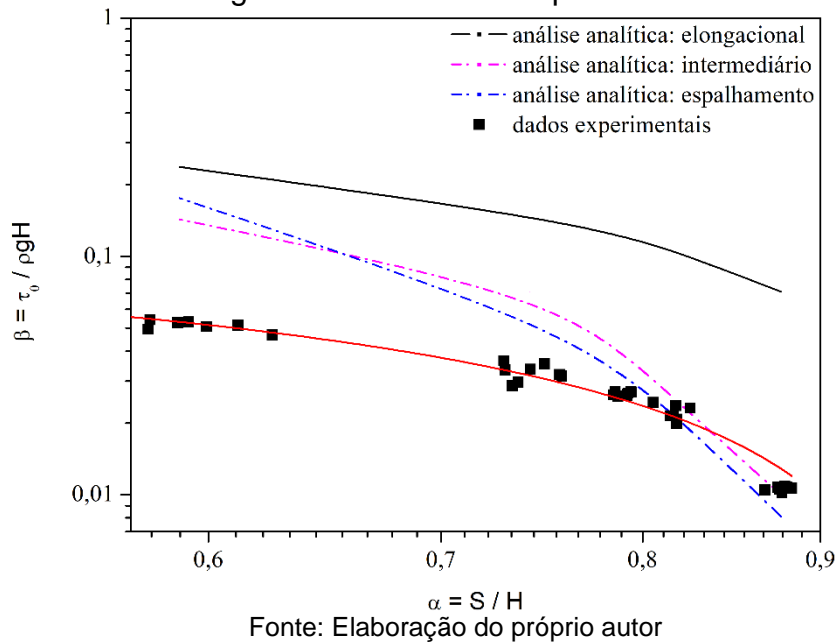
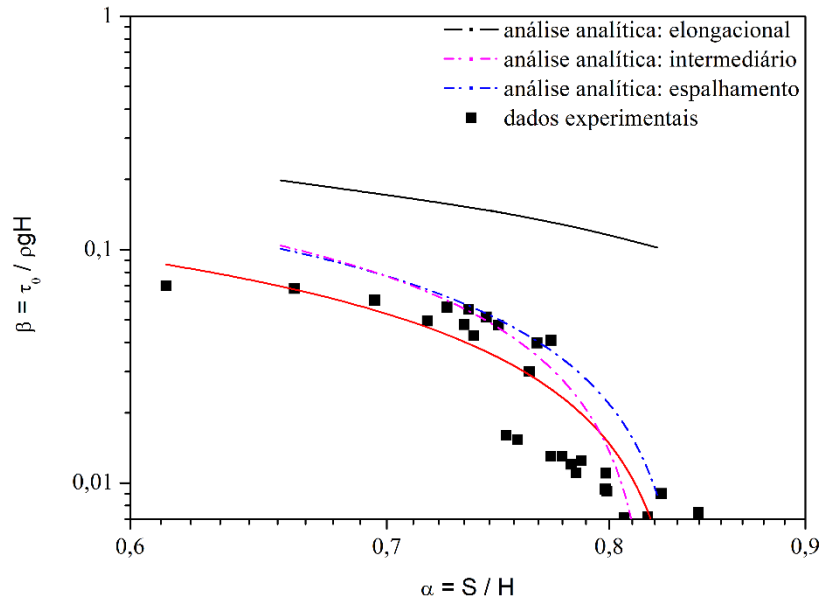


Figura A.4 - Adimensionais de abatimento e tensão limite de escoamento e seus regimes de escoamento para argamassas



Em função da pequena faixa de abatimento avaliada neste trabalho, o regime puramente elongacional não foi atingido, conforme pode ser visto a partir das Figuras A.2, A.3 e A.4.. Os modelos analíticos de regime intermediário e de espalhamento para géis de carbopol, lamas e argamassas foram os que mais se adequaram aos dados obtidos neste trabalho.

APÊNDICE B - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E MEDIDAS DE ABATIMENTO

As nomenclaturas definidas neste Apêndice são definidas por S (medida de abatimento); τ_0 (tensão limite de escoamento); K_n (índice de consistência); n (índice de escoamento); ρ (massa específica); T (tempo de abatimento); $\dot{\gamma}_{m\u00e9dio}$ (taxa de deformação média medida no *slump test*) e μ_{ap} (viscosidade aparente obtida a partir da taxa de deformação média medida no *slump test*).

Tabela B.1 - Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,15\%$

Ensaio	S manual (mm)	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	pH	ρ (kg/m ³)
1	257,00	255,52	33,08	12,48	0,41	7,48	1012,00
2	253,00	256,64	39,65	12,13	0,42	7,63	1018,00
3	253,50	258,62	36,50	12,14	0,42	7,64	1014,00
4	253,00	257,41	31,13	13,16	0,41	7,50	1012,00
5	252,00	259,49	33,22	11,60	0,42	7,53	1018,00
6	254,00	255,32	31,61	11,66	0,44	7,60	1020,00
7	249,00	257,72	26,82	12,90	0,41	7,47	1018,00
8	254,00	259,76	36,21	12,64	0,41	7,53	1016,00
9	253,00	254,39	31,59	13,16	0,41	7,49	1016,00
10	255,00	257,43	29,22	12,20	0,42	7,47	1010,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.2 - Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,17\%$

Ensaio	S manual (mm)	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	pH	ρ (kg/m ³)
1	247,00	245,40	61,30	11,88	0,45	7,34	998,00
2	249,00	243,49	61,46	8,11	0,53	7,30	1002,00
3	244,00	244,39	56,15	11,30	0,46	7,15	990,00
4	245,00	242,45	56,52	14,84	0,42	7,15	1002,00
5	245,00	243,12	51,75	18,91	0,38	7,17	1008,00
6	248,00	244,34	54,52	11,88	0,45	7,18	994,00
7	242,00	242,14	55,60	18,08	0,39	7,18	996,00
8	246,00	239,92	57,45	18,84	0,39	7,15	1000,00
9	246,00	242,42	59,00	20,34	0,38	7,15	990,00
10	250,00	240,91	57,47	19,32	0,39	7,24	984,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.3 - Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,20\%$

Ensaio	S manual (mm)	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	pH	ρ (kg/m ³)
1	240,00	245,54	73,12	25,52	0,38	7,48	1018,00
2	235,00	235,87	79,61	25,72	0,38	7,17	1014,00
3	234,00	234,38	71,50	27,47	0,37	7,23	1012,00
4	241,00	235,04	78,94	27,98	0,37	7,27	1018,00
5	243,00	232,49	70,55	30,37	0,36	7,23	1018,00
6	237,00	236,34	74,06	31,12	0,36	7,34	1002,00
7	242,00	239,80	70,42	27,98	0,37	7,21	1020,00
8	243,00	238,25	72,40	33,95	0,35	7,15	1018,00
9	241,00	239,64	75,06	27,68	0,38	7,25	1012,00
10	241,00	240,84	73,49	29,98	0,37	7,17	1018,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.4 - Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,22\%$

Ensaio	S manual (mm)	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	pH	ρ (kg/m ³)
1	228,00	230,12	103,02	32,76	0,37	7,02	1014,00
2	224,00	225,95	103,28	35,63	0,37	6,97	1014,00
3	228,00	228,99	89,69	40,99	0,34	6,86	1014,00
4	221,00	221,39	101,25	34,48	0,34	6,92	1018,00
5	226,00	223,34	96,39	33,59	0,38	7,11	1018,00
6	233,00	229,85	98,16	37,79	0,36	6,92	1018,00
7	229,00	224,28	101,32	33,91	0,38	6,93	1020,00
8	226,00	226,47	103,16	33,44	0,38	6,89	1014,00
9	232,00	225,75	94,53	35,16	0,37	6,85	1014,00
10	226,00	227,69	96,14	34,42	0,38	6,92	1016,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.5 - Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,25 \%$

Ensaio	S manual (mm)	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	pH	ρ (kg/m ³)
1	214,00	217,78	104,67	42,76	0,36	7,31	1016,00
2	214,00	222,96	107,67	43,48	0,36	7,16	1006,00
3	212,00	217,96	113,88	39,93	0,38	7,07	1012,00
4	221,00	220,36	122,71	43,37	0,37	7,08	1020,00
5	219,00	215,05	108,90	44,41	0,36	7,06	1018,00
6	220,00	218,22	116,55	43,02	0,37	7,10	1012,00
7	218,00	221,83	109,93	43,86	0,36	7,09	1006,00
8	221,00	216,63	108,20	43,25	0,37	7,04	1014,00
9	217,00	217,51	109,46	42,00	0,37	6,87	1010,00
10	219,00	220,45	104,56	42,63	0,37	6,86	1012,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.6 - Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,27 \%$

Ensaio	S manual (mm)	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	pH	ρ (kg/m ³)
1	216,00	214,95	121,40	47,98	0,36	7,48	1012,00
2	217,00	216,70	126,06	45,25	0,37	7,63	1018,00
3	217,00	216,27	114,85	48,00	0,36	7,64	1014,00
4	211,00	216,95	123,21	45,93	0,37	7,50	1012,00
5	210,00	208,45	122,03	44,86	0,38	7,53	1018,00
6	215,00	212,46	125,82	45,50	0,37	7,60	1020,00
7	211,00	208,32	114,06	47,86	0,36	7,47	1018,00
8	211,00	213,75	119,26	42,79	0,38	7,53	1016,00
9	216,00	210,07	114,14	44,09	0,37	7,49	1016,00
10	220,00	213,23	113,45	44,10	0,38	7,47	1010,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.7 - Caracterização reológica, física, química e medida de abatimento de gel de carbopol de $C_m = 0,32 \%$

Ensaio	S manual (mm)	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	pH	ρ (kg/m ³)
1	206,00	206,03	140,51	50,81	0,37	7,17	1014,00
2	195,00	201,85	140,30	49,79	0,37	7,15	1018,00
3	197,00	197,20	153,27	49,47	0,38	7,10	1020,00
4	199,00	205,29	140,77	55,26	0,36	7,12	1022,00
5	200,00	206,31	146,38	47,21	0,39	7,12	1014,00
6	199,00	206,75	145,68	51,37	0,37	7,15	1014,00
7	205,00	206,14	138,02	56,51	0,36	7,12	1014,00
8	203,00	204,91	132,18	52,67	0,36	7,22	1020,00
9	211,00	214,05	143,26	49,75	0,37	7,09	1012,00
10	213,00	213,34	144,85	51,27	0,37	7,19	1014,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.8 - Caracterização reológica, física e medida de abatimento de lama $C_v = 27,5 \%$

Ensaio	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	ρ (kg/m ³)
1	264,93	46,21	2,99	0,57	1451,10
2	260,24	45,40	2,81	0,59	1452,60
3	263,21	44,29	2,93	0,58	1452,70
4	262,80	45,79	2,88	0,58	1453,90
5	262,85	45,76	3,24	0,56	1455,30
6	264,14	46,85	2,70	0,60	1453,70
7	262,51	46,63	3,22	0,57	1452,60
8	263,71	47,13	3,39	0,56	1455,30

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.9 - Caracterização reológica, física e medida de abatimento de lama
Cv = 30,0 %

Ensaio	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	ρ (kg/m ³)
1	241,70	106,88	4,18	0,61	1491,20
2	247,68	101,38	4,09	0,65	1491,50
3	244,92	94,00	9,36	0,50	1492,70
4	244,49	94,21	7,68	0,53	1493,10
5	245,32	103,80	6,40	0,55	1492,30
6	245,48	87,17	8,90	0,51	1491,20
7	245,48	90,93	10,02	0,49	1490,90
8	244,83	94,05	9,08	0,51	1491,80

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.10 - Caracterização reológica, física e medida de abatimento de lama
Cv = 31,0 %

Ensaio	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	ρ (kg/m ³)
1	236,12	114,69	14,94	0,46	1507,20
2	237,56	115,41	14,68	0,47	1507,10
3	237,71	118,30	13,99	0,49	1507,90
4	238,15	119,99	14,63	0,48	1506,50
5	235,70	119,84	16,33	0,46	1507,60
6	235,45	116,18	17,46	0,45	1505,40
7	237,58	117,06	16,62	0,46	1507,70
8	238,28	119,47	17,85	0,46	1508,30

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.11 - Caracterização reológica, física e medida de abatimento de lama
Cv = 32,5 %

Ensaio	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	ρ (kg/m ³)
1	222,82	151,36	62,77	0,30	1531,30
2	224,89	159,45	53,44	0,33	1531,70
3	227,19	143,66	69,02	0,28	1531,20
4	227,49	141,85	77,75	0,28	1532,60
5	221,01	133,29	87,79	0,26	1531,90
6	220,15	129,12	95,27	0,26	1534,20
7	219,13	150,43	82,42	0,28	1531,50
8	218,93	164,51	67,72	0,32	1531,10

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.12 - Caracterização reológica, física e medida de abatimento de lama
Cv = 34,0 %

Ensaio	S automatizado (mm)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	ρ (kg/m ³)
1	173,18	248,01	103,34	0,32	1555,40
2	161,30	272,01	100,30	0,29	1554,70
3	176,37	240,80	126,49	0,26	1555,60
4	172,97	226,51	137,01	0,25	1556,70
5	177,68	242,58	128,65	0,27	1554,30
6	179,79	231,96	136,00	0,25	1555,10
7	187,80	214,49	92,76	0,32	1556,00
8	183,57	234,72	102,23	0,34	1554,50

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.13 - Caracterização reológica, física e medida de abatimento da argamassa ARG 1

Tempo (min)	Ensaio	S automatizado (mm)	T (s)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	$\dot{\gamma}_{\text{médio}}$ (s ⁻¹)	μ_{ap} (Pa.s)	ρ (kg/m ³)
10	1	217,06	-	413,45	0,30	1,08	-	-	2149,00
	2	222,90	-	474,71	0,05	1,32	-	-	2142,84
	3	224,23	-	332,95	0,01	1,82	-	-	2129,53
30	1	174,61	-	397,80	0,19	1,21	-	-	2132,75
	2	194,40	-	554,79	0,00	1,95	-	-	2153,56
	3	191,05	-	383,42	0,09	1,35	-	-	2144,25
50	1	146,00	-	46,21	2,99	0,57	-	-	2139,75
	2	159,58	-	837,40	0,00	3,09	-	-	2148,63
	3	165,39	-	534,55	2,93	0,58	-	-	2137,44

Obs: os dados da argamassa ARG 1 foram descartados das análises

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.14 - Caracterização reológica, física e medida de abatimento da argamassa ARG 2

Tempo (min)	Ensaio	S automatizado (mm)	T (s)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	$\dot{\gamma}_{\text{médio}}$ (s ⁻¹)	μ_{ap} (Pa.s)	ρ (kg/m ³)
10	1	224,60	1,95	300,79	0,04	1,49	2,27	132,51	2156,72
	2	231,76	2,15	260,67	0,03	1,50	3,37	77,46	2170,41
	3	229,85	2,05	254,88	0,19	1,18	3,61	70,86	2175,44
30	1	215,19	1,95	311,31	0,12	1,28	1,69	184,44	2142,97
	2	220,58	1,90	352,01	0,15	1,20	2,65	133,18	2156,97
	3	217,75	2,05	360,26	0,04	1,41	3,5	103,08	2162,44
50	1	198,65	2,15	433,60	0,01	1,70	1,54	281,63	2166,69
	2	208,46	2,00	383,13	0,09	1,31	1,80	212,83	2148,56
	3	183,92	1,80	443,29	0,01	1,80	2,52	175,92	2155,16

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela B.15 - Caracterização reológica, física e medida de abatimento da argamassa ARG 3

Tempo (min)	Ensaio	S automatizado (mm)	T (s)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	$\dot{\gamma}_{médio}$ (s ⁻¹)	μ_{ap} (Pa.s)	ρ (kg/m ³)
10	1	236,01	1,55	78,07	1,76	0,87	3,22	25,78	2132,09
	2	235,30	1,95	69,07	1,53	0,89	2,22	32,45	2126,04
	3	231,72	1,65	75,84	1,37	0,91	3,07	25,92	2147,64
30	1	227,19	1,70	96,61	0,97	0,98	4,21	23,88	2146,31
	2	225,65	2,10	79,21	1,30	0,93	2,70	30,56	2125,12
	3	228,78	1,90	74,54	2,47	0,81	4,11	20,03	2131,99
50	1	221,23	1,50	268,61	0,09	1,33	4,20	64,15	2137,15
	2	219,99	2,35	300,81	0,03	1,50	2,58	116,85	2144,60
	3	222,94	2,25	322,63	0,09	1,25	3,49	92,66	2134,19

Fonte: Elaboração do próprio autor

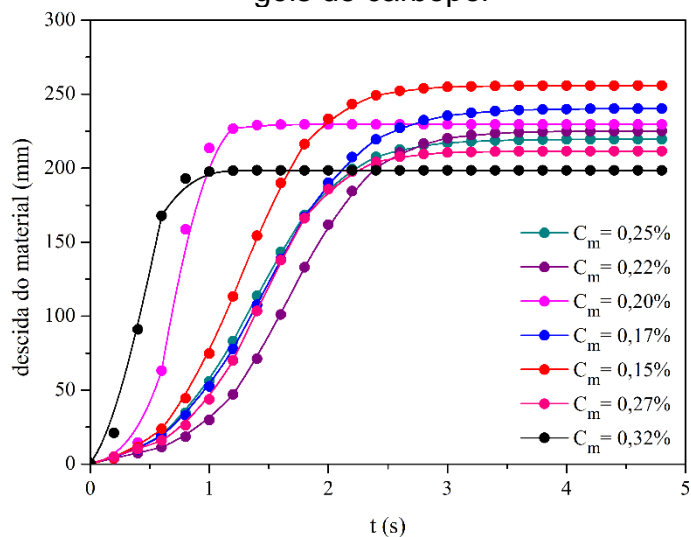
Tabela B.16 - Caracterização reológica, física e medida de abatimento da argamassa ARG 4

Tempo (min)	Ensaio	S automatizado (mm)	T (s)	τ_0 (Pa)	K_n (Pa.s ⁿ)	n	$\dot{\gamma}_{médio}$ (s ⁻¹)	μ_{ap} (Pa.s)	ρ (kg/m ³)
10	1	245,62	1,95	44,95	1,83	0,84	2,60	18,85	2141,10
	2	242,21	1,90	44,92	2,10	0,82	3,17	15,89	2145,52
	3	253,21	1,75	46,98	2,07	0,80	3,28	15,94	2145,47
30	1	239,67	1,60	57,83	1,71	0,87	3,03	20,55	2135,28
	2	239,45	1,95	59,19	1,88	0,86	3,06	20,98	2141,10
	3	247,64	2,00	56,83	1,61	0,86	2,95	20,67	2148,60
50	1	234,60	2,05	66,93	1,61	0,88	3,76	19,18	2148,05
	2	233,32	1,85	70,76	2,51	0,81	3,60	21,63	2157,21
	3	239,53	2,00	67,44	1,62	0,87	2,89	24,77	2158,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

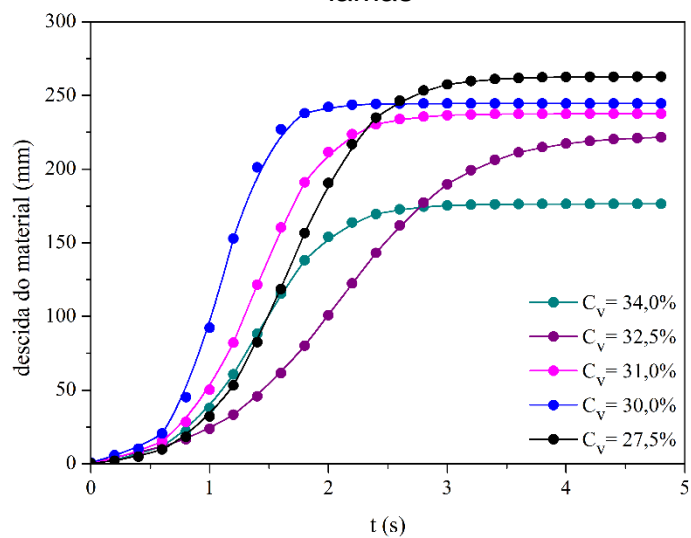
APÊNDICE C - CURVAS DE DESCIDA DO MATERIAL DURANTE O SLUMP TEST

Figura C.1 - Curvas características de descida do material durante o *slump test* de géis de carbopol



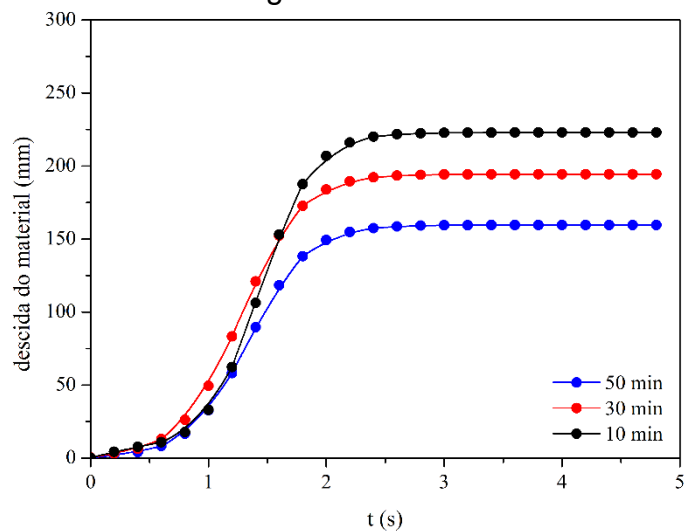
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura C.2 - Curvas características de descida do material durante o *slump test* de lamas



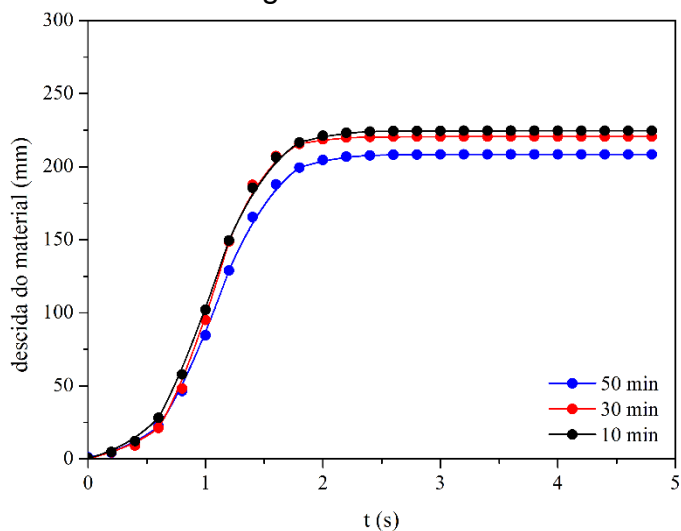
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura C.3 - Curvas características de descida do material durante o *slump test* da argamassa ARG 1



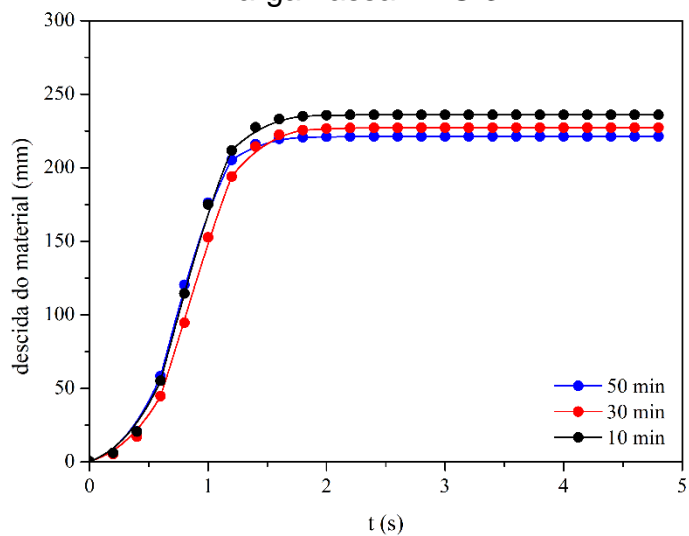
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura C.4 - Curvas características de descida do material durante o *slump test* da argamassa ARG 2



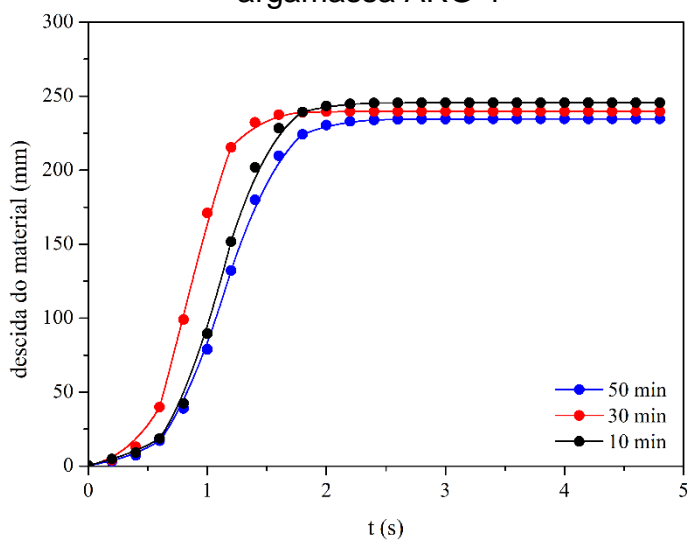
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura C.5 - Curvas características de descida do material durante o *slump test* da argamassa ARG 3



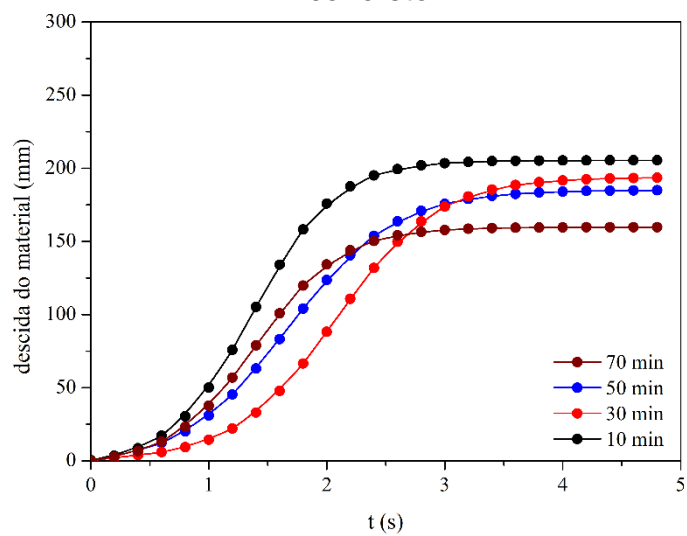
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura C.6 - Curvas características de descida do material durante o *slump test* da argamassa ARG 4



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura C.7 - Curvas características de descida do material durante o *slump test* de concreto



Fonte: Elaboração do próprio autor

APÊNDICE D - COMPLEMENTAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE DE ARGAMASSAS A PARTIR DO SLUMP TEST

A análise realizada para obtenção da viscosidade aparente (μ_{ap}) de argamassas foi baseada na definição de um funcional baseado nos seguintes parâmetros: medida do abatimento (S), tempo de abatimento (T), altura do cone de Abrams (H), tensão limite de escoamento (τ_0), massa específica do material (ρ) e aceleração da gravidade (g). Essa análise forneceu um modelo, representado pela Equação 35, capaz de obter a viscosidade aparente de argamassas a partir dos parâmetros abatimento e tempo de abatimento.

Entretanto, há um outro parâmetro que pode ser medido no ensaio de abatimento de tronco de cone e que pode indicar a maior ou menor viscosidade do material, trata-se da medida de espalhamento (D). Assim, um novo funcional da viscosidade aparente pôde ser definido com o acréscimo do parâmetro espalhamento, conforme Equação D.1.

$$\mu_{ap} = \varphi(S, H, D, \rho, g, \tau_0, T) \quad (D.1)$$

O desenvolvimento da análise dimensional permitiu a obtenção de 5 adimensionais (π_n), sendo quatro deles já obtidos e apresentados no tópico 4.5.2 (Equação 26, 27, 31 e 32), sendo o quinto adimensional representado pela Equação D.2.

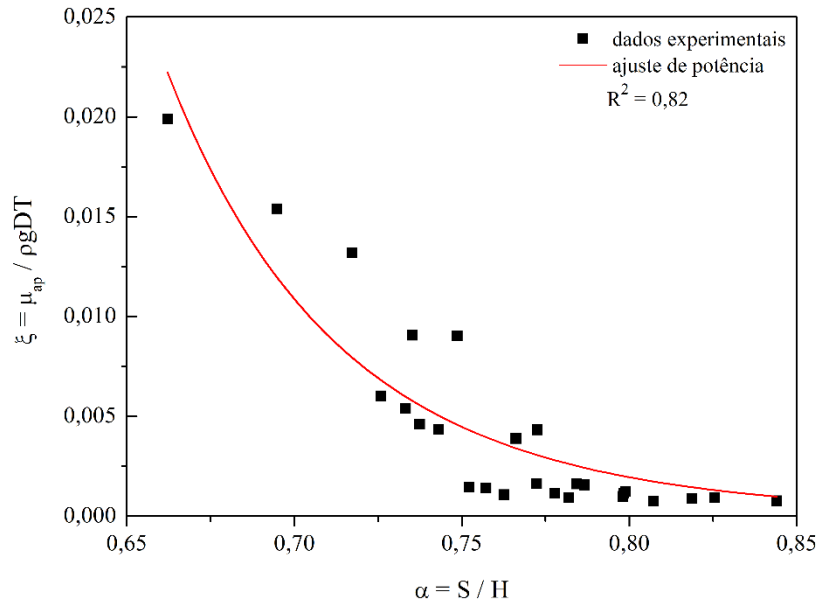
$$\pi_5 = \frac{D}{H} \quad (D.2)$$

Relacionando os adimensionais definidos pelas Equações 31, 32 e D.2, obtém-se um novo adimensional, conforme Equação D.3, a partir do qual as análises são realizadas.

$$\pi_6 = \frac{\mu_{ap}}{\rho g D T} \quad (D.3)$$

Utilizando os adimensionais S/H e $\mu_{ap}/\rho gDT$ e os dados experimentais, foi possível obter uma função de viscosidade aparente a partir das medidas de abatimento, espalhamento e tempo de abatimento, conforme Figura D.1.

Figura D.1 - Relação entre adimensionais criados para complementação da avaliação de viscosidade de argamassas



A partir da relação entre os adimensionais característicos apresentados na Figura D.1, pôde-se obter um modelo empírico de correlação das medidas de abatimento, espalhamento e tempo de abatimento com a viscosidade aparente da argamassa. Tal modelo é apresentado na Equação D.4, sendo os coeficientes, da função de ajuste definida, apresentados na Tabela D.1.

$$\xi(\alpha) = E\alpha^{-F} \quad (D.4)$$

sendo α igual s/H , ξ definido como $\mu_{ap}/\rho gDT$ e, E e F , os coeficientes da função potência definida como ajuste.

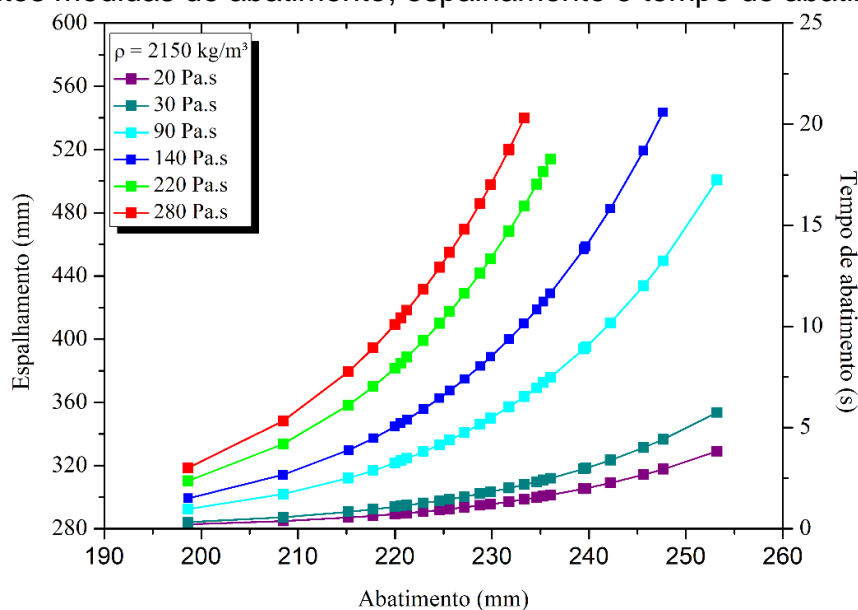
Tabela D.1 - Parâmetros da função de correlação para obtenção da viscosidade aparente de argamassas a partir das medidas de abatimento, espalhamento e tempo de abatimento

Material	E	F	R ²
Argamassa	$1,10 \times 10^{-4}$	12,87	0,82

Fonte: Elaboração do próprio autor

A Figura D.2 ilustra o comportamento de viscosidade aparente das argamassas avaliadas segundo diferentes medidas de abatimento, espalhamento e tempo de abatimento.

Figura D.2 - Comportamento da viscosidade aparente das argamassas para diferentes medidas de abatimento, espalhamento e tempo de abatimento

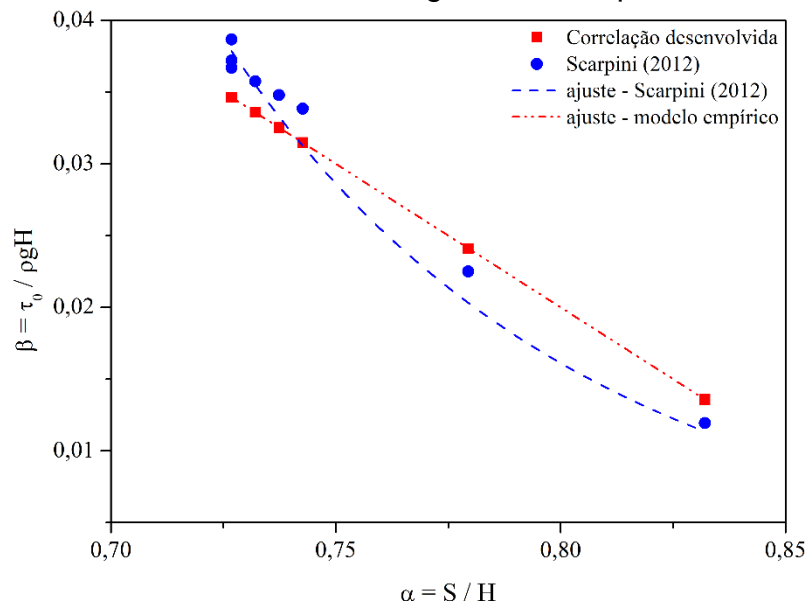


Fonte: Elaboração do próprio autor

APÊNDICE E - VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE CORRELAÇÃO DE TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO

A fim de verificar a validade dos modelos de correlação, obtidos neste trabalho de Mestrado, para determinação de tensão limite de escoamento, as Figuras E.1, E.2 e E.3 ilustram a comparação de resultados encontrados na literatura, para géis de carbopol, lamas e argamassas, frente aos dados fornecidos a partir das correlações obtidas neste trabalho.

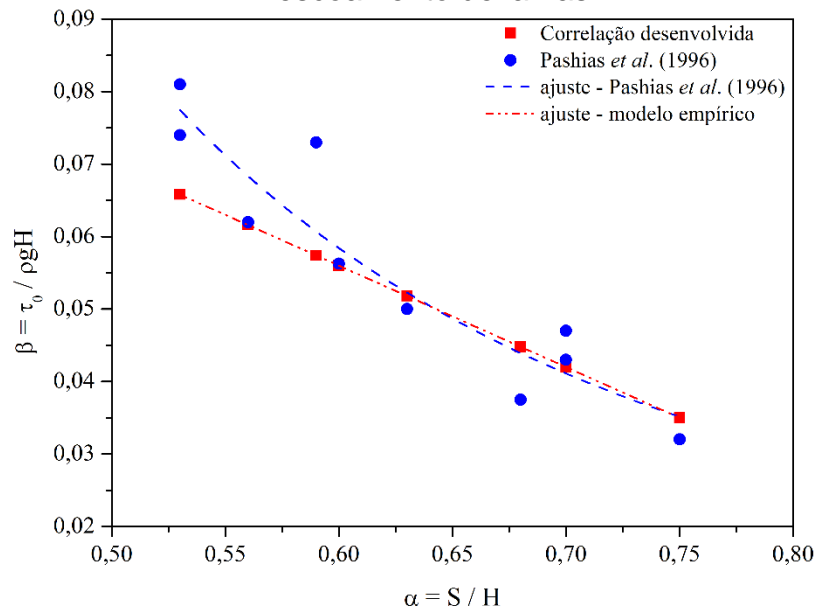
Figura E.1 - Avaliação da correlação definida para obtenção da tensão limite de escoamento de géis de carbopol



Fonte: Elaboração do próprio autor

A partir da Figura E.1, a qual apresenta dados de tensão limite de escoamento de géis de carbopol obtidos no estudo de Scarpini (2012) e dados desse parâmetro reológico a partir da Equação 34 (considerando gel de carbopol), é possível verificar proximidade entre o parâmetro medido no trabalho de Scarpini (2012) e aquele calculado a partir da correlação desenvolvida, sendo o erro máximo obtido de 14% (medida de referência tomada como dado da literatura).

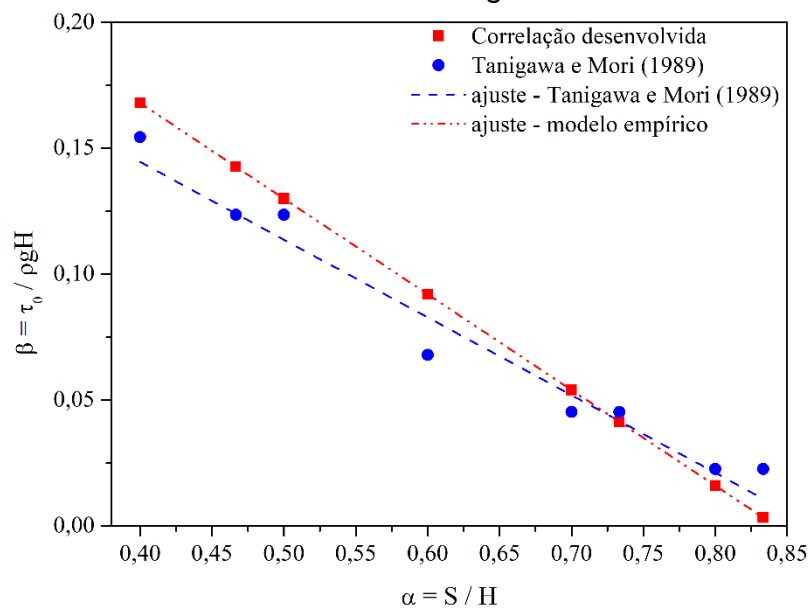
Figura E.2 - Avaliação da correlação definida para obtenção da tensão limite de escoamento de lamas



Fonte: Elaboração do próprio autor

A Figura E.2 realiza a comparação entre dados de tensão limite de escoamento de lamas avaliadas no trabalho de Pashias et al. (1996) e aqueles obtidos partir da Equação 34 (considerando lama). A correlação definida para as lamas apresentou capacidade em gerar resultados de tensão limite de escoamento próximos àqueles medidos por Pashias et al. (1996), com erro máximo de 19,5%.

Figura E.3 - Avaliação da correlação definida para obtenção da tensão limite de escoamento de argamassas



Fonte: Elaboração do próprio autor

Por último, a Figura E.3 permite avaliar o comportamento da correlação definida para obtenção da tensão limite de escoamento de argamassas. Para isso, utilizou-se os dados obtidos por Tanigawa e Mori (1989), os quais avaliaram argamassas convencionais. Pode-se verificar, a partir da comparação realizada na Figura E.3, que o modelo de correlação desenvolvido para argamassas é capaz de fornecer resultados próximos àqueles obtidos por Tanigawa e Mori (1989), com erro máximo de 35%.

De forma geral, os modelos desenvolvidos para obtenção da tensão limite de escoamento de géis de carbopol, lamas e argamassas mostraram-se capazes de prever tal parâmetro reológico. Assim, tais modelos podem ser utilizados a fim de caracterizar o material, segundo a estimativa da tensão limite de escoamento, a partir da medida de abatimento.

No que diz respeito à validação do modelo de correlação desenvolvido para obtenção da viscosidade de argamassas, não foram encontrados trabalhos na literatura com todas as informações necessárias para a alimentação do modelo (abatimento e tempo de abatimento), de forma que essa tarefa fica aberta para trabalhos futuros.