

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 31/07/2020.

**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

FICHA CATALOGRÁFICA

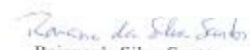
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

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

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CIB/8 - 9999

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

COORDENADOR: 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


Profa. 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 lamassas 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, lamassas 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)
$\dot{\gamma}_{médio}$	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 caulinítica.....	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.

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.