



Manuella Suellen Vieira Galindo

**Desenvolvimento de uma Metodologia para
Determinação da Viscosidade de Solos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Rio de Janeiro
Maio de 2013



Manuella Suellen Vieira Galindo

**Desenvolvimento de uma Metodologia para
Determinação da Viscosidade de Solos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a. Mônica Feijó Naccache

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. George de Paula Bernardes

UNESP-Guaratinguetá

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de maio de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Manuella Suellen Vieira Galindo

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Alagoas - UFAL em 2010. Foi bolsista do Programa de Educação Tutorial - PET no período de 2006 a 2010. As principais áreas de interesse e linhas de pesquisa são: Mecânica dos Solos, Geotecnia Experimental e Solos não Saturados.

Ficha catalográfica

Galindo, Manuela Suellen Vieira

Desenvolvimento de uma metodologia para determinação da viscosidade do solos / Manuella Suellen Vieira Galindo ; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos – 2013.

122 f. il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Reologia. 3. Viscosidade de solos. 4. Ensaio de abatimento de tronco de cone. 5. Corridas de massa. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Para meus pais, Maria Suely e Valdemir, e para meu irmão, Philipe, pelo
apoio e amor incondicional.

Agradecimentos

A Deus por ser minha fortaleza em épocas de tormenta e por todas as graças alcançadas.

Aos meus pais, Suely e Valdemir, que entenderam minhas lágrimas em épocas de estresse, incentivando-me a não desistir nunca. Sou imensamente grata por vocês estarem ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu irmão, Philipe, pelos momentos de conversa e descontração.

A todos os meus familiares que sempre ficaram na torcida pelo meu sucesso.

Ao meu orientador, Tácio Mauro Pereira de Campos, pelas discussões, dúvidas tiradas e por ensinar-me o caminho a seguir.

Ao professor Franklin Antunes pela sua paciência, carinho e por todos os ensinamentos transmitidos.

Ao professor Paulo Mendes que mesmo sem me conhecer foi bastante solícito, abrindo-me as portas do mundo da reologia.

Aos membros da banca examinadora por todas as sugestões e críticas construtivas feitas a este trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, Amauri, Deivid e Josué, por estarem sempre dispostos a ajudar, e a engenheira Mônica pela atenção e cooperação.

A todos os membros do Laboratório de Reologia da PUC-Rio, em especial a Alexadra, Carol e Paula que me ajudaram com os testes reológicos e ao técnico Denilson pelos momentos do café.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas da PUC-Rio, José Nilson e Euclides, pelas ideias de melhoria na concepção do equipamento.

Aos meus irmãos do coração, Ingrid, Mariana e Thiago, por todo o apoio concedido durante esses dois anos, por sempre me mostrarem uma luz no final do túnel quando eu me achava perdida em meio à escuridão das incertezas e dúvidas se um dia eu conseguiria fazer o meu equipamento funcionar. Vocês foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos meus queridos amigos: Bianca, Nathália, Roberta, Renata, Orosco, Paola, Perlita, Lidia, Gary, Miriam, Ronald, Carlos, Hugo, João e Mário, por todos os momentos de descontração e estudos intensos.

As minhas queridas amigas e companheiras de quarto, Ivânia e Lana, por ouvirem minhas lamentações e me ajudarem nessa luta diária.

A ALTA Geotecnia Ambiental, por me proporcionar o contato com a parte prática da engenharia geotécnica. Álvaro, Débora, Alexandre, Guilherme, Elaine, André Barros, André Carvalho, Kadson e Taíse; muito obrigada pelos ensinamentos e por todo o apoio.

A todos os meus amigos de Maceió que mesmo espalhados pelo Brasil sempre torceram pelo meu sucesso: Luciana, Ingrid, Marcus, Celso, Aline, Hélivio, Michelle, Artur, Gabi, Maria Elisa, Daysy e Natália, obrigada pelo apoio.

Ao CNPq e à PUC-Rio pelos incentivos concedidos.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Galindo, Manuella Suellen Vieira; De Campos, Tácio Mauro Pereira. **Desenvolvimento de uma metodologia para determinação da viscosidade de solos.** Rio de Janeiro, 2012, 122p. Dissertação de mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para determinação experimental da viscosidade de solos, visando subsidiar estudos associados ao desenvolvimento de corridas de massa. Este parâmetro reológico é importante não somente para a determinação dos valores de velocidade, como também para a delimitação de áreas a serem afetadas por tal tipo catastrófico de movimento. Para o alcance do referido objetivo, foi desenvolvido um equipamento a partir de adaptações no conjunto de abatimento de tronco de cone, utilizado para a realização de estudos em concreto, e estabelecida uma metodologia padrão a ser empregada nos ensaios voltados para a determinação da viscosidade em solos. De posse da taxa de cisalhamento, grandeza variável em função da umidade do material e obtida como resultado do ensaio realizado no equipamento desenvolvido, foram realizados testes reológicos em reômetro placa-placa e viscosímetro de Brookfield, buscando-se correlacionar umidade, taxa de cisalhamento e viscosidade. Foram analisados quatro solos de litologias diferentes, o que permitiu uma boa espacialização dos resultados obtidos, culminado com a determinação de uma equação em que a viscosidade pode ser estimada em função da taxa de cisalhamento.

Palavras-chave

Reologia; viscosidade de solos; ensaio de abatimento de tronco de cone; corridas de massa.

Abstract

Galindo, Manuella Suellen Vieira; De Campos, Tácio Mauro Pereira (Advisor). **Development of a methodology for the determination of the soil viscosity**. Rio de Janeiro, 2012, 122p. Msc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This research presents a proposal for experimental determination of the soil viscosity in order to evaluate the development of debris flows. This rheology parameter is important for determining not only the velocity values, but also to delimitate the area to be affected by a debris flow. For this, a device was developed from adaptations in slump test, used for studies on concrete, and established a standard methodology to be used in tests aimed at determining the viscosity in soils. In possession of the shear rate, which varies depending on soil moisture, obtained as a result of the test performed on the equipment developed rheological tests were performed on plate-plate rheometer and Brookfield viscometer. After that, correlations of the soil moisture, the shear rate and the viscosity of each sample were established. At total, four different lithologies of soil were analyzed, which allowed a good spatial distribution of the results, culminating in the determination of an equation in which the viscosity can be estimated as a function of the shear rate.

Keywords

Rheology; viscosity of soils; slump test; debris flows.

Sumário

1 Introdução	21
2 Revisão bibliográfica	24
2.1. Aspectos conceituais relacionados à reologia	24
2.1.1. Tensão, deformação e viscosidade	26
2.1.1.1. Tensão	26
2.1.1.2. Deformação	27
2.1.1.3. Viscosidade	28
2.2. Classificação dos modelos reológicos	30
2.2.1. Fluidos Newtonianos	31
2.2.2. Fluidos não-Newtonianos	31
2.3. Medição das propriedades reológicas	35
2.3.1. Viscosimetria	35
2.3.2. Reometria	36
2.4. Reologia do concreto fresco	39
2.5. Reologia de solos	42
3 Características dos locais estudados	46
3.1. Campo Experimental II PUC-Rio	47
3.1.1. Localização e amostragem	47
3.1.2. Geologia e geomorfologia	48
3.1.3. Aspectos climáticos	49
3.2. Bacias dos rios Quitite e Papagaio	50
3.2.1. Localização e amostragem	50
3.2.2. Geologia e geomorfologia	51
3.2.3. Aspectos climáticos	52
3.3. Reserva Biológica do Tinguá	52
3.3.1. Localização e amostragem	52
3.3.2. Geologia e geomorfologia	54
3.3.3. Aspectos climáticos	54

4 Caracterização física, química e mineralógica dos solos	56
4.1. Caracterizações físicas	56
4.1.1. Massa específica dos grãos (ρ_s)	56
4.1.2. Análise granulométrica conjunta	57
4.1.3. Limites de consistência e atividade das argilas	60
4.1.4. Classificação do solo	60
4.2. Caracterização química	61
4.2.1. Análise química total	61
4.3. Caracterização mineralógica	61
4.3.1. Análise térmica diferencial (ATD)	62
5 Equipamentos e Técnicas Experimentais	65
5.1. Medida direta da viscosidade	65
5.1.1. Viscosímetro de Brookfield	65
5.1.2. Reômetro	67
5.2. Medida indireta da viscosidade	73
5.2.1. Abatimento do tronco de cone tradicional	73
5.2.2. Abatimento do tronco de cone modificado	75
6 Abatimento do tronco de cone desenvolvido	79
6.1. Componentes do equipamento	79
6.1.1. Estrutura de sustentação	79
6.1.2. Tronco de cone	81
6.1.3. Manta antiaderente	81
6.1.4. Dispositivo de monitoramento dos deslocamentos verticais	82
6.2. Procedimento experimental	88
6.3. Limitações do equipamento	91
7 Apresentação e análise dos resultados	94
7.1. Abatimento do tronco de cone	94
7.2. Viscosímetro de Brookfield	100
7.3. Reômetro	101
7.4. Análise conjunta: abatimento de tronco de cone e reômetro	104

8 Conclusões e sugestões	110
8.1. Conclusões	110
8.1.1. Abatimento do tronco de cone	110
8.1.2. Comportamento reológico: análise da viscosidade	111
8.2. Sugestões para trabalhos futuros	112
9 Referências Bibliográficas	113

Lista de Figuras

Figura 1 - Notação matricial e representação gráfica do tensor tensão	27
Figura 2 - Conceito de deformação: (A) rotação sem deformação; (B) deformação por cisalhamento; (C) deformação normal (Bretas & D'Ávila, 2000)	27
Figura 3 - Modelo de placas paralelas proposto por Newton para explicar o conceito de viscosidade (Barnes <i>et al</i> , 1969)	28
Figura 4 - Esquema da classificação dos fluidos reais (Adaptado de Mothé, 2007)	30
Figura 5 - Comportamento reológico dos fluidos independentes do tempo (Adaptado de Fox & McDonald, 1998)	33
Figura 6 - Diferentes geometrias apresentadas pelos reômetros rotacionais: a) cilindros coaxiais; b) cone-placa; c) placa-placa (Vliet & Lyklema, 2005)	37
Figura 7 - Reologia do concreto: a) mesma tensão de escoamento e diferentes viscosidades; b) mesma viscosidade e diferentes tensões de escoamento (Adaptado de Ferraris, 1999)	40
Figura 8 - Reômetro motorizado desenvolvido por Karmakar & Kushwaha (2007)	43
Figura 9 - Correlação entre a tensão de escoamento e a concentração de sedimentos (O'Brien & Julien, 1988)	45
Figura 10 - Correlação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos (O'Brien & Julien, 1988)	45
Figura 11 - Localização do Campo Experimental II da PUC-Rio (Beneveli, 2002)	47
Figura 12 - Coleta do material do Campo Experimental II da PUC-Rio	47
Figura 13 - Descrição morfológica do perfil do Campo Experimental II da PUC-Rio (Dylac, 1994)	49
Figura 14 - Localização das bacias dos rios Quitite e Papagaio e modelo digital do terreno em alta resolução (2m x 2m) gerado por Gomes (2006)	50
Figura 15 - Coleta do material das bacias dos rios Quitite e Papagaio	51
Figura 16 - Coleta do material do interior da Reserva Biológica do Tinguá	53
Figura 17 - Coleta do material do Campus Avançado da PUC em Tinguá	53

Figura 18 - Mapa geológico de Tinguá (Adaptado de De Campos, 2012)	55
Figura 19 - Curvas granulométricas dos ensaios realizados com hexametáfosfato de sódio como defloculante	58
Figura 20 - Curvas granulométricas dos ensaios realizados com água como defloculante	58
Figura 21 - Ensaio de sedimentação feito com hexametáfosfato (provetas da esquerda) e água (provetas da direita), após 21h, ressaltando a aglomeração em forma de flocos do solo em seu estado natural	59
Figura 22 - Análise térmica diferencial para CEII	63
Figura 23 - Análise térmica diferencial para BQP	63
Figura 24 - Análise térmica diferencial para CAT	63
Figura 25 - Análise térmica diferencial para RBT	64
Figura 26 - Viscosímetro Brookfield modelo DV I Primer	66
Figura 27 - a) Recipiente utilizado para colocar o material a ser ensaiado; b) Haste utilizada nos ensaios (splinder 31)	66
Figura 28 - Reômetro Haake Mars utilizado neste trabalho	67
Figura 29 - Tipos de geometrias disponíveis: a) couette; b) cone-placa; c) placa-placa do tipo <i>cross hatch</i> ; d) placa-placa do tipo lisa	68
Figura 30- Extravasamento de material no ensaio utilizando uma folga de 4,0mm	69
Figura 31 - Grande dispersão encontrada a partir de 200s no ensaio realizado para o ponto mais seco da BQP (w= 81,50%)	69
Figura 32 - Indicativo do ressecamento do material durante o ensaio: espaço vazio entre as placas	70
Figura 33 - Diminuição da viscosidade do material a partir de 200s no ensaio realizado para um dos pontos mais úmidos do CAT (w= 103,46%)	70
Figura 34 - Lâminas de água formadas pela sedimentação do material	70
Figura 35 - Capa protetora de acrílico utilizada para minimizar a exposição da amostra ao ar condicionado	71
Figura 36 - Etapas do procedimento experimental estabelecido para os ensaios no reômetro: a) regularização da temperatura; b) homogeneização do material; c) colocação da amostra na placa inferior; d) espalhamento do material; e) limpeza da lateral da geometria; f) colocação da capa protetora e início do ensaio	72

Figura 37 - Ensaio de abatimento do tronco de cone (Reis, 2008)	74
Figura 38 - Ensaio de abatimento de tronco de cone modificado proposto por Tanigawa <i>et al.</i> (1991)	75
Figura 39 - Aparelho do abatimento do tronco de cone modificado (Reis, 2008)	76
Figura 40 - Procedimento experimental do ensaio de abatimento do tronco de cone modificado (Ferraris & De Larrard, 1998)	77
Figura 41 - Estrutura de sustentação projetada: a) vista frontal; b) vista lateral; c) vista superior (dimensões em cm)	80
Figura 42 - Configurações do tronco de cone desenvolvidas para o ensaio modificado: a) apenas dois tarugos; b) tarugos mais anilhas de 0,5kg	81
Figura 43 - Transdutor linear e disco de latão utilizados nesta configuração	82
Figura 44 - Transdutor para potenciômetro, a esquerda, e sistema de aquisição de dados a direita	83
Figura 45- Dificuldade do transdutor para acompanhar o deslocamento do solo: a) a massa já teve seu movimento encerrado, mas o transdutor ainda continua a descer; b) apenas após alguns segundos o transdutor atinge a posição final da massa de solo	83
Figura 46 - Ensaio realizado com a colocação de um peso adicional no disco que faz contato solo/transdutor com a finalidade de aumentar a velocidade de deslocamento da haste	84
Figura 47 - Acelerômetro utilizado na segunda configuração	84
Figura 48 - Detalhamento do disco de acrílico utilizado (dimensões em cm)	85
Figura 49 - Detalhe do equipamento desenvolvido antes da realização do ensaio: a) dimensões de projeto (unidades em cm); b) configuração real	86
Figura 50 - Detalhe do equipamento desenvolvido após a realização do ensaio: a) dimensões de projeto (unidades em cm); b) configuração real	87
Figura 51 - Preparação da amostra: mistura água e solo	88
Figura 52 - Glicerina a ser utilizada nas paredes internas do tronco de cone	88
Figura 53 - Preenchimento do tronco de cone	89
Figura 54 - Acabamento da superfície superior do tronco de cone	89
Figura 55 - Colocação do peso para ascensão do cone	90
Figura 56 - Coleta de material para determinação da umidade	90
Figura 57 - Espaço existente entre o transdutor e o tronco de cone	91

Figura 58 - Diferenças no preenchimento do tronco de cone: a) solo com umidade igual a 1,1 vezes o limite de liquidez; b) solo com umidade igual a 1,3 vezes o limite de liquidez	92
Figura 59 - Limitação associada ao espaço existente entre o transdutor e o tronco de cone: a) abatimento inferior a 24cm; b) abatimento superior a 24cm	92
Figura 60 - Ensaios realizados com umidades superiores a duas vezes o limite de liquidez do material: velocidade máxima do transdutor utilizado	93
Figura 61 - Material da RBT após o ensaio do abatimento de tronco de cone modificado para diferentes umidades: a) 68,37%; b) 77,86%; c) 88,61%; d) 97,34%	95
Figura 62 - Curvas de deslocamento com o tempo para o solo CEII	97
Figura 63 - Curvas de deslocamento com o tempo para o solo BQP	97
Figura 64 - Curvas de deslocamento com o tempo para o solo CAT	97
Figura 65 - Curvas de deslocamento com o tempo para o solo RBT	98
Figura 66 - Relação entre a umidade do ensaio de abatimento de tronco de cone e a taxa de cisalhamento	99
Figura 67 - Relação entre a concentração de sedimentos e a taxa de cisalhamento	99
Figura 68 - Grande dispersão para dados coletados no viscosímetro de Brookfield para taxas de cisalhamento abaixo de 10 s^{-1} (Kiryu, 2006)	100
Figura 69 - Gráfico da viscosidade com o tempo para o solo CEII	102
Figura 70 - Gráfico da viscosidade com o tempo para o solo BQP	102
Figura 71 - Gráfico da viscosidade com o tempo para o solo CAT	102
Figura 72 - Gráfico da viscosidade com o tempo para o solo RBT	103
Figura 73 - Ajuste dos resultados experimentais para CEII	105
Figura 74 - Ajuste dos resultados experimentais para BQP	105
Figura 75 - Ajuste dos resultados experimentais para CAT	105
Figura 76 - Ajuste dos resultados experimentais para RBT	106
Figura 77 - Ajuste dos resultados experimentais para todos os solos estudados	107
Figura 78 - Relação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos para CEII	107
Figura 79 - Relação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos para BQP	108

Figura 80 - Relação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos para CAT	108
Figura 81 - Relação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos para RBT	108
Figura 82 - Relação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos para todos os solos ensaiados, com destaque para as faixas de valores obtidas por Galindo (2013) e O'Brien & Julien (1988)	109

Lista de tabelas

Tabela 1 - Equações, modelos e parâmetros reológicos para fluidos não-newtonianos independentes do tempo (Adaptado de Machado, 2002)	33
Tabela 2 - Resumo dos ensaios e equipamentos existentes para medir os parâmetros reológicos do concreto no estado fresco (Adaptado de Reis, 2008)	40
Tabela 3 - Viscosidade e tensão de escoamento como função da concentração de sedimentos (Adaptado de O'Brien & Julien, 1988)	44
Tabela 4 - Valores de Gs obtidos para os solos em estudo	57
Tabela 5 - Resumo da granulometria dos solos estudados com os dois defloculantes utilizados	59
Tabela 6 - Resultados dos ensaios dos limites de consistência e atividade das argilas	60
Tabela 7 - Composição química dos solos estudados	61
Tabela 8 - Umidade do ensaio, limite de liquidez e razão entre ambos	94
Tabela 9 - Concentração de sedimentos e umidade dos ensaios realizados	96
Tabela 10 - Correspondência entre a umidade do ensaio de abatimento de tronco de cone e a taxa de cisalhamento	98
Tabela 11 - Equações e coeficientes de correlação das retas obtidas a partir da relação entre a umidade e a taxa de cisalhamento	99
Tabela 12 - Equações e coeficientes de correlação das retas obtidas a partir da relação entre a umidade e a taxa de cisalhamento	100
Tabela 13 - Umidades dos ensaios no abatimento de tronco de cone, no reômetro e diferença entre ambas	101
Tabela 14 - Correspondência entre a viscosidade definida no reômetro (η) e a taxa de cisalhamento (γ) obtida no ensaio de abatimento de tronco de cone	103
Tabela 15 - Viscosidade dos materiais envolvidos nas corridas de massa ocorridas no Rio de Janeiro em 1996 (Adaptado de Macias <i>et al</i> , 1997)	104
Tabela 16 - Equações e coeficientes de correlação das retas obtidas a partir da relação entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento	106
Tabela 17 - Equações e coeficientes de correlação das retas obtidas a partir da relação entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento	109

Lista de símbolos e abreviações

- diâmetro de abertura da malha da peneira

% - porcentagem

A - água

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ATD - Análise Térmica Diferencial

BQP - Bacia dos rios Quitite e Papagaio

C - Celsius

CAT - Campus Avançado da PUC em Tinguá

CEII - Campo Experimental II PUC-Rio

Cv - concentração de sedimentos

dv - diferença de velocidade entre duas partículas vizinhas

dy - distância entre duas partículas vizinhas

\vec{F} - vetor força

Gs - peso específico dos grãos

H - hexametafosfato de sódio

Ia - índice de atividade das argilas

IP - índice de plasticidade

K - índice de consistência

LL -limite de liquidez

n - índice de comportamento

\hat{n} - direção do vetor

NM - Norma Mercosul

ONU – Organização das Nações Unidas

RBT- Reserva Biológica do Tinguá

s - abatimento

SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos

T - tempo de abatimento

$\bar{\bar{t}}$ - tensor tensão

Vs - volume de sedimentos

Vt - volume de água mais sedimentos

w - umidade do ensaio

w_a - umidade do ensaio de abatimento de tronco de cone

w_r - umidade do ensaio no reômetro

$\dot{\gamma}$ - taxa de cisalhamento

η - viscosidade aparente

μ - viscosidade absoluta

ρ - densidade do concreto

σ_{ii} - tensão normal atuante no plano perpendicular à direção \hat{i}

τ - tensão

τ_{ij} - tensão cisalhante atuante no plano perpendicular à \hat{i} na direção \hat{j}

τ_o - tensão de escoamento

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que
ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.*

Arthur Schopenhauer