Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo

Brivaldo Gomes de Almeida

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas**

Piracicaba
2008

Brivaldo Gomes de Almeida
Químico Industrial

**Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de
condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**

Orientador:

Prof. Dr. ALVARO PIRES DA SILVA

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas**

**Piracicaba
2008**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Almeida, Brivaldo Gomes de

Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo / Brivaldo Gomes de Almeida. - Piracicaba, 2008.
103 p. : il.

Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Condicionador do solo 2. Densidade do solo 3. Granulometria do solo 4. Resistência dos solos 5. Solo coeso - Qualidade I. Título

CDD 631.43
A447m

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Ofereço

Aos meus pais, *José Bastos (in memorian)* e *Josete*, pela formação moral que governou toda minha vida.

Dedico

A minha esposa e melhor amiga, **Ceres**,
cujo relacionamento é baseado em uma afeição sincera,
como a de dois espíritos que se procuraram na multidão
e que sob as Bênçãos de Deus mais uma vez se encontraram
para enfrentar juntos os degraus da evolução espiritual.
E, se assim for Sua vontade, estaremos juntos novamente
por muitas encarnações, pois a sintonia existente entre nós
me faz acreditar que o resultado será a plena felicidade.

Ninguém pode ver o reino de Deus se não nascer de novo. Se um homem não renasce da água e do Espírito, não pode entrar no reino de Deus. (JOÃO, cap. III, v. 1 a 12.)

AGRADECIMENTOS

A Deus por mais esta vida e oportunidade de crescimento espiritual alicerçada nas Suas Leis, e por Agir todos os dias concretamente para proteção dos meus caminhos.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pela liberação de minhas atividades funcionais e a CAPES pela concessão da bolsa através do programa PICDT (Programa Institucional de Capacitação Docente e Técnica).

A ESALQ/USP pela infra-estrutura e suporte financeiro para o pleno desenvolvimento de nossas atividades no Laboratório de Física de Solos.

Ao Prof. Alvaro, pela sua orientação na concretização deste trabalho.

Ao Prof. Paulo Libardi pelos conhecimentos transmitidos com tanto primor e dedicação singulares e, principalmente, pela nossa amizade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, pela contribuição à minha formação profissional e convivência harmoniosa.

Ao Prof. Steven Raine, meu orientador na Austrália, pelo apoio e constante disponibilidade em me atender, contribuindo para meu aperfeiçoamento profissional.

Aos meus amigos Fernando Garbuio, Sérgio Weine e Ana Livia pela amizade incondicional e presença constante durante do curso.

Aos meus amigos de mesma orientação na ESALQ: Karina, Afrânio, João, Sueli e, especialmente, ao Getúlio, pela sua ajuda incondicional nesses anos de convivência.

Aos colegas de curso Fernando, Maurício, Márcia, Vânia, Raul, Aline, Renata e Raphael pelo companheirismo e amizade solidificados no dia-a-dia.

Aos Funcionários do Departamento de Solos da ESALQ/USP pela constante disposição em atende nossas solicitações: Camila, Nancy, Luiz Silva, Wladimir e, especialmente, ao amigo Jair.

Aos pós-graduandos que conheci durante este curso, tanto no Programa de Solos e Nutrição de Plantas, como também no de Irrigação e Drenagem; Genética e Física do Ambiente Agrícola.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO	17
2 DESENVOLVIMENTO	21
2.1 Revisão Bibliográfica	21
2.1.1 Métodos em Física do Solo	21
2.1.1.1 Resistência Tênsil do Solo	21
2.1.1.2 Densidade do solo	25
2.1.1.3 Análise Granulométrica de Solos	28
2.1.2 Uso de condicionadores químicos em solos	36
2.2 Material e Métodos	40
2.2.1 Resistência tênsil do solo	40
2.2.1.1 Solos: localização, amostragem e separação dos agregados	40
2.2.1.2 Determinação da resistência tênsil de agregados de solo	41
2.2.2 Densidade do solo	43
2.2.2.1 Solos: localização, amostragem e separação dos agregados	43
2.2.2.2 Número de imersões do agregado no verniz e seu tempo de secagem	45
2.2.2.3 Cálculo da densidade dos agregados	46
2.2.2.4 Densidade dos agregados: comparação entre os revestimentos verniz e resina saran	48
2.2.3 Análise granulométrica do solo	49
2.2.3.1 Seleção dos métodos e curva de retenção de água no solo	54
2.2.4 Uso de condicionadores químicos em solos coesos	58
2.2.4.1 Solos: localização, pré-tratamento e preparo das amostras	59
2.2.5 Análises estatísticas	64
2.3 Resultados e Discussão	64
2.3.1 Resistência tênsil de agregados de solos	64
2.3.2 Densidade do solo	66
2.3.2.1 Efeitos da imersão na estabilidade dos agregados e espessura do revestimento	66

2.3.2.2 Efeitos do número imersões e do tempo de secagem na densidade dos agregados	68
2.3.2.3 Densidade de agregados: comparação entre resina saran e verniz automotivo	69
2.3.3 Análise Granulométrica	70
2.3.3.1 Primeiro modo de seleção: comparação entre as frações granulométricas pela pipeta e demais métodos.....	70
2.3.3.2 Segundo modo de seleção: comparação entre as frações granulométricas a partir de mudanças na classe textural dos solos	73
2.3.3.3 Terceiro modo de seleção: comparação entre as frações granulométricas a partir de funções de pedotransferência (FPT).....	76
2.3.4 Uso de condicionadores químicos em solos coesos.....	79
3 CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS.....	87

RESUMO

Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo

Alguns dos mais freqüentes parâmetros utilizados como indicadores de qualidade do solo são: resistência tênsil de agregados (RT); densidade do solo (Ds); textura e curva de retenção de água do solo (CRAS). O objetivo deste estudo foi avaliar e desenvolver métodos para a determinação destes parâmetros e testar o uso de condicionadores químicos na redução do caráter coeso de solos, propondo alterações que tornem esses parâmetros mais precisos. Para RT foi proposto o uso do dinamômetro IMPAC, como equipamento alternativo ao KALATEC. Foram utilizados agregados (diâmetro 22,2 mm) do horizonte diagnóstico de um ARGISSOLO ACINZENTADO coeso, localizados em Pacajus-CE. Na determinação da Ds, avaliou-se a viabilidade do uso de um verniz automotivo como revestimento, substituto à resina saran na impermeabilização de agregados. Foram realizados ensaios preliminares para estabilidade desses agregados, número de imersões no verniz e tempo de secagem. Para validação da metodologia foram utilizados, além dos solos coesos e não coesos de Pacajus-CE, outros cinco solos, coletados em Piracicaba-SP. Na seleção da metodologia para análise granulométrica (AG) foram testados seis métodos: hidrômetro (com uma e quatro leituras); pipeta; micro-pipeta; “método rápido” e o do IAC, em 20 amostras de TFSA dos horizontes A e/ou B provenientes de 16 perfis de solos representativos dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, com teores de argila entre 6 e 81 %. A comparação entre os métodos supracitados foi realizada com base em: ajuste por regressão linear entre as frações granulométricas determinadas pelo método da pipeta *versus* os demais; mudanças na classe textural indicadas no triângulo textural; e o melhor ajuste entre a fração argila e a umidade do solo retida na tensão 1500 kPa. Dados de retenção da água no solo, obtidos a partir do equipamento WP4-T, foram ajustados pelo modelo proposto em Genuchten (1980). Para avaliar o uso de condicionadores químicos na redução do caráter coeso de solos, a partir de medidas da RT, foram testados dois polímeros aniônicos (PAM). No Brasil, utilizaram-se os agregados coesos de Pacajus-CE, nos quais aplicou-se PAM por capilaridade. Na Austrália, usaram-se agregados de um solo hardsetting e o PAM foi aplicado com spray (líquido) ou a lanço (sólido), combinado com condicionadores a base de cálcio (sulfato e cloreto). Os valores da RT determinados por ambos os equipamentos (IMPAC e KALATEC) não diferiram entre si. No entanto, o IMPAC reduziu em quase 50 % o tempo de análise, com exatidão e precisão satisfatórias, o que reitera sua viabilidade em substituir o KALATEC. Os resultados da Ds demonstraram que o verniz automotivo Lazzudur é uma excelente alternativa à resina saran, além de reduzir o custo e o tempo de análise. Com relação à escolha do método para AG, a comparação entre os métodos mostrou que o do hidrômetro com uma leitura como uma alternativa viável, devido a sua simplicidade nos procedimentos de análises. A aplicação de PAM nos agregados dos solos coesos de Pacajus-CE não diminuiu a sua RT, sugerindo-se a redução das taxas aplicadas. A aplicação de PAM combinado com gesso refletiu na melhoria da qualidade física dos solos coesos da Austrália, reduzindo os valores da RT desses solos.

Palavras-chave: Resistência tênsil; Densidade do solo; Granulometria do solo; Solo coeso; Polímero aniônico

ABSTRACT

Alternative methods to determination of soil physical properties and use of chemistry conditioners at soil quality study

Some of the most common parameters used as indicators of soil quality are tensile strength of aggregates (TS), bulk density (Bd), texture and soil water retention curve (SWRC). The aims of this work were to: (i) evaluate and develop methods for determining these parameters; (ii) test the use of the chemical conditioners in reducing the character of cohesive soil. The less expensive IMPAC dynamometer was proposed to TS analysis, as alternative equipment to KALATEC. Aggregates (22.2 mm diameter) from cohesive soil Ultisol, located in northeast of Brazil were used. The feasibility of using automotive varnish to coat soil clods for bulk density measurement was evaluated for replacing SARAN resin. Preliminary tests were conducted to determine the clod stability, the number of immersions of clod in the varnish and drying time of the varnish. To confirm this methodology, clods of the cohesive and not cohesive Ultisol soil from northeast of Brazil and the other five soils from southern of Brazil were used. Six methods were evaluated for measuring particle size analysis (PSA): Hydrometer (with one and four readings); pipette, micro-pipette, "rapid method" and IAC method (Brazilian institute) using 20 samples of the A and/or B horizons of air dried soil from 16 soil profiles more significant of Santa Catarina and Rio Grande do Sul States, with clay range from 6 to 81 %. The comparison among these methods was conducted by: fitting linear regression between the pipette method versus the other; changing in textural class in the textural triangle; and the best fitting between fraction clay and soil moisture hold in 1500 kPa tension. Soil water retention data by WP4-T equipment were fitted by the model proposed in Genuchten (1980). Changes of TS of the cohesive soil after treatment with two kinds of anionic polymer (PAM) were investigated. In Brazil, clods from northeast were used and the PAM was applied by capillarity in the laboratory. In Australia, clods of a hardsetting soil were used and the PAM was applied by spray (liquid) or spread (solid), besides of conditioners based calcium (chloride and sulfate). No significant difference was detected at TS values determined by both of equipments tested. However, IMPAC equipment reduced time of analysis by almost 50%, with high accuracy, as a result it can replace the KALATEC equipment. Bulk density data showed that the automotive varnish is an excellent alternative to SARAN resin. The simpler procedure for determination of PSA was the hydrometer method (one reading), consequently, it was preferred than the other. The application of PAM at cohesive soils, from northeast of Brazil, did not reduce TS due to the high PAM concentration used in this study. This result suggests to need to reduce PAM rates. Gypsum and PAM combination improved the Australian cohesive soil physical quality by reducing its TS.

Keywords: Tensile strength; Bulk density; Particle-size analysis; Hardsetting; PAM

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Instrumentos para a medida da força máxima para quebra de agregados. Adaptada de: a) Rogowski, Moldenhauer e Kirkham, (1968); b) Guérif (1990); c) Öztas, Sönmez e Canbolat (1999).....	24
Figura 2 - Diagrama esquemático do hidrômetro da ASTM, modelo 152 H	32
Figura 3 - Water Potential Meter (a), com vista da parte interna e detalhes da câmara de leitura (b), equação para estimar a energia da água retida no solo (c)	35
Figura 4 - Estrutura química de monômeros de acrilamida e da poliacrilamida.....	38
Figura 5 - Localização do município de Pacajus no estado do Ceará da região nordeste do Brasil	40
Figura 6 - Detalhes do processo de coleta das amostras (a), saturação dos blocos (b), separação manual dos agregados (c) e tamanho médio dos agregados (d).....	41
Figura 7 - Dinamômetro da IMPAC. Detalhes da fratura do agregado.....	42
Figura 8 - KALATEC conforme descrito em Imhoff, Silva e Dexter (2002). Detalhes: a) sistema de aquisição de dados; b) dinamômetro; c) da célula de carga e placa de ruptura	42
Figura 9 - Localização do município de Piracicaba - SP da região sudeste do Brasil.....	44
Figura 10 - Detalhes dos procedimentos para determinação do volume dos agregados pelo princípio de Arquimedes. Adaptada de Cresswell e Hamilton (2002)	46
Figura 11 - Detalhes dos procedimentos do método da micro-pipeta: a) pesagem; b) adição do dispersante; c) agitação e dispersão; d) calibração micropipeta, e) pipetagem da argila	51
Figura 12 - Detalhes dos procedimentos do método rápido: a) agitação/dispersão; b) separação da fração areia e coleta da argila e silte; c); sucção e descarte da argila	52
Figura 13 - Triângulo de classificação textural de solos segundo Santos et al. (2005).....	54
Figura 14 - Método sugerido pelo manual do WP 4 - T para estimar a curva de retenção da água no solo.....	55
Figura 15 - Detalhe do processo de saturação das amostras para determinação do gradiente de umidade na obtenção da curva de retenção de água no solo	56
Figura 16 - Detalhe do processo de compactação e equilíbrio da temperatura das amostras.....	57

Figura 17 - Detalhes dos procedimentos para a determinação da curva de retenção de água por meio do WP 4-T	57
Figura 18 - Detalhes da determinação da curva de retenção de água nos agregados do solo, com e sem polímero	59
Figura 19 - Localização do município de Toowoomba, pertencente ao estado de Queensland na nordeste da Austrália	60
Figura 20 - Pré-tratamento do solo australiano para o experimento com polímero: a) montagem das peneiras; b) aplicação da água residual - CSG.....	60
Figura 21 - Detalhes da montagem dos funis para o experimento com polímeros no solo coeso da Austrália	61
Figura 22 - Forma de aplicação do polímero líquido no solo coeso da Austrália. Detalhe da maior dosagem (30 L ha^{-1}).....	62
Figura 23 - Equipamento utilizado nos ensaios de resistência tênsil dos agregados (a), com detalhe para o momento da sua ruptura.....	63
Figura 24 - Efeito do número de imersões do agregado em verniz automotivo e tempo de secagem na densidade do solo em comparação com o método da resina saran. As barras de erro indicam intervalos de confiança de 95%.....	68
Figura 25 - Ajuste entre as frações granulométricas determinadas pelo método da pipeta e demais métodos para os 20 solos estudados	71
Figura 26 - Classes texturais dos 20 solos determinadas pelo triângulo textural segundo Santos et al. (2005), utilizando o software TAL (2008)	75
Figura 27 - Análise de regressão linear entre os teores de argila e a umidade do solo retida na tensão de 1500 kPa, estimada pelo RetC, a partir da curva de retenção de água no solo pelo WP 4-T	77
Figura 28 - Análise de regressão linear entre os teores de argila e a umidade gravimétrica do solo retida na tensão de 1500 kPa determinada em câmaras de pressão segundo Klute (1986)	77
Figura 29 - Valores de resistência tênsil e umidade dos agregados em função das doses de polímero aplicada	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Algumas características físicas e químicas dos solos estudados.....	44
Tabela 2 - Classificação e distribuição geográfica dos perfis modais dos solos utilizados no estudo das análises granulométrica e de retenção de água	49
Tabela 3 - Características físicas e químicas das amostras dos perfis modais dos solos estudados para as análises granulométrica e de retenção de água.....	50
Tabela 4 - Descrição dos procedimentos para análise granulométrica pelos seis métodos estudados	53
Tabela 5 - Arranjo experimental para os tratamentos com diferentes taxas de polímero, no estado sólido (PS) e líquido (PL), associado com CaSO_4 no estado sólido (G) e Ca Cl_2 líquido (Cl) aplicados aos solos	62
Tabela 6 - Análise estatística descritiva dos ensaios de resistência tênsil de agregados realizados entre um medidor equipado com dinamômetro da IMPAC e outro com motor de passo	65
Tabela 7 - Valores de F da análise de variância da relação volumétrica (RV) para o revestimento dos agregados com verniz ou resina saran e a comparação entre revestimentos e entre solos pelo teste de Tukey.....	67
Tabela 8 - Comparação entre a densidade dos agregados revestidos com resina saran ou verniz	69
Tabela 9 - Coeficientes de determinação (R^2) das regressões lineares para as frações granulométricas determinadas nos 20 solos pelo método da pipeta e os demais	72
Tabela 10 - Distribuição da classe textural dos solos (1 a 20) com base nos valores das frações granulométricas obtidas pelos seis métodos avaliados.....	75
Tabela 11 - Teores de argila determinados pelos métodos estudados e R^2 entre os teores de argila e $\theta_{1500\text{kPa}}$, estimada (RetC-WP 4-T) e determinada (KLUTE, 1986)	78
Tabela 12 - Valores médios da resistência tênsil (RT) dos agregados submetidos aos tratamentos com diferentes taxas de polímero, associado com CaSO_4 e CaCl_2	81

1 INTRODUÇÃO

O avanço nas técnicas e métodos em física do solo tem gerado diagnósticos mais bem fundamentados a respeito da manutenção e da sustentabilidade em agroecossistemas. Nas últimas décadas, a rápida degradação dos ecossistemas sob exploração antrópica, especialmente nos países tropicais em desenvolvimento, tem despertado crescente preocupação com a preservação e a sustentabilidade da exploração agrícola. O uso, manejo e a sustentabilidade destes sistemas podem ser avaliados por meio de propriedades físicas do solo.

A qualidade do solo é definida como a capacidade de um tipo específico de solo funcionar como ecossistema natural ou manejado para sustentar a produtividade animal e vegetal, manter a qualidade da água e do ar e suportar o crescimento humano. Os conceitos de qualidade do solo são comumente utilizados para avaliar a sustentabilidade do manejo do solo em agroecossistemas. Pesquisas em ciência do solo têm mostrado a importância em categorizar o tipo de solo e suas propriedades, ou variáveis, em relação ao uso da terra, especialmente para fins agrícolas.

A elaboração de métodos e técnicas que permitam avaliar a sustentabilidade de diferentes agroecossistemas, a partir de determinadas propriedades intrínsecas do solo, é um dos maiores desafios enfrentados para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável. Alguns dos mais frequentes parâmetros utilizados como indicadores de qualidade física do solo são a resistência tênsil de agregados, a densidade do solo, a textura do solo e a curva de retenção da água no solo.

A resistência tênsil de agregados de solo, que pode ser definida como a força por unidade de área necessária para causar a ruptura dos agregados, tem sido utilizada para quantificar o efeito do adensamento natural dos horizontes coesos. Os equipamentos mais confiáveis utilizados para esta determinação geralmente incluem dispositivos como: motor de passo de alta precisão; célula de carga; computador e software, que os tornam onerosos. A busca de equipamentos mais simples, compactos, de fácil transporte no campo, com menor custo, mas com exatidão e precisão satisfatórias, tem sido um desafio na física do solo.

A densidade do solo, razão entre a massa de sólidos e o volume total do solo, constitui-se um índice do grau de arrançamento das partículas do solo. Os principais métodos adotados no Brasil para determinação da densidade do solo, em laboratório, são: proveta; cilindro (ou anel) volumétrico e torrão impermeabilizado com parafina. Neste último, o grande desafio é o uso de revestimentos mais adequados para determinar o volume do torrão pelo princípio de Arquimedes.

Aliado ao uso da parafina, a resina saran é considerada um revestimento padrão de agregados para a determinação da densidade do solo. Porém, a atual indisponibilidade deste produto no mercado mundial tem motivado pesquisas na busca de produtos alternativos ao revestimento de agregados de solos.

A textura do solo refere-se às proporções relativas das frações areia, silte e argila em uma determinada massa de terra fina seca ao ar (< 2 mm). De modo geral, a escolha do método mais apropriado para determinar a granulometria dos solos tem sido baseada na fração argila. O critério desta escolha tradicionalmente mais utilizado é feito com base na maior quantidade de argila recuperada em comparação com o método padrão (pipeta).

A melhoria da qualidade física do solo também tem sido avaliada pela aplicação de condicionadores químicos em solos que apresentam caráter coeso. Este caráter é um atributo pedogenético (adensamento) e engloba horizontes do solo que não apresentam uma organização estrutural visível (maciços), de consistência dura, muito dura ou até extremamente dura, quando secos, e friável, quando úmidos. Além do Brasil, o comportamento coeso foi também identificado em solos de outros países, recebendo a denominação de *hardsetting*. Este termo foi utilizado, pela primeira vez, a solos do oeste da Austrália para identificar aqueles que apresentavam variação marcante, principalmente em seus parâmetros físicos, entre períodos secos e úmidos. Pesquisas têm mostrado semelhanças entre o caráter coeso, definido no Brasil, e o *hardsetting*, identificado e mapeado na Austrália. Porém, há carência de métodos para avaliar a eficiência do uso de condicionadores químicos na redução dos efeitos negativos associados à forte coesão desses solos quando secos. Além disto, existem dúvidas a respeito do mecanismo de ação desses condicionadores, especificamente na redução da resistência tênsil de agregados do solo.

As inter-relações dos parâmetros físicos com processos como o movimento de água e ar no solo e suas relações com o crescimento de plantas são complexas e mostram a importância da precisão e exatidão na determinação dos parâmetros anteriormente comentados.

Este trabalho testou as hipóteses: a) parâmetros físicos do solo podem ser determinados por métodos outros que os tradicionais, para facilitar sua utilização como indicadores da qualidade do solo e b) solos que possuem caráter coeso podem ter reduzida sua coesão quando incorporados com condicionadores químicos, com base em que:

- o dinamômetro “IMPAC” substitui o equipamento atualmente em operação no Laboratório de Física do Solo da ESALQ na determinação da resistência tênsil de agregados de solos;

- o verniz automotivo substitui a resina saran como revestimento de agregados na determinação da densidade do solo;
- o melhor método para análise granulométrica do solo é aquele que apresenta melhor ajuste entre o teor de argila recuperado e a umidade do solo correspondente à tensão de 1500 kPa;
- o uso de condicionadores químicos (polímeros, gesso e cloreto de cálcio) aumenta a retenção de água e reduz o caráter coeso dos solos e, conseqüentemente, sua resistência tênsil.

O objetivo geral, portanto, do trabalho foi avaliar e desenvolver métodos para a determinação de parâmetros físicos do solo, propondo alterações que tornem esses parâmetros mais fáceis de serem utilizados como indicadores da qualidade física do solo, bem como testar o uso de condicionadores químicos na redução do caráter coeso de solos. Para alcançar este objetivo geral, foram selecionados os seguintes objetivos específicos:

- testar a viabilidade do uso do dinamômetro “IMPAC” como equipamento alternativo para a determinação da resistência tênsil de agregados de solos;
- avaliar a viabilidade de um método alternativo para determinação da densidade do solo pela aplicação do verniz automotivo como revestimento de agregados do solo;
- selecionar um método de análise granulométrica de solos, com base naquele que apresentar melhor ajuste entre a fração argila e a umidade do solo correspondente à tensão 1500 kPa;
- avaliar a eficiência e o mecanismo de ação de condicionadores químicos de solos (polímeros, gesso e cloreto de cálcio) na redução do caráter coeso do solo, a partir de medidas da umidade residual e da resistência tênsil de agregados.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Métodos em Física do Solo

2.1.1.1 Resistência Tênsil do Solo

A resistência tênsil é definida como a força, de compressão ou de tração, por unidade de área requerida para que o solo se rompa (DEXTER; WATTS, 2000). É um parâmetro significativo na determinação da energia requerida para cultivar o solo e quebrá-lo em agregados menores. É usada como um fator que mede a habilidade das raízes em penetrar o solo (IBARRA; McKYES; BROUGHTON, 2005), sendo um indicador muito sensível às mudanças na estrutura do solo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2006).

A resistência tênsil do solo é controlada por vários fatores, incluindo cátions adsorvidos, quantidade de argila dispersa e conteúdo de água (UTOMO; DEXTER, 1981). Devido ao aumento da deformação plástica com o teor de água, Dexter e Kroesbergen (1985) sugerem que os agregados sejam secos em estufa antes de serem submetidos ao ensaio de compressão para determinação da resistência tênsil. Estes autores consideraram o estado dos agregados secos em estufa uma condição reprodutível padrão e não recomendam a secagem ao ar porque pequenas diferenças na umidade do agregado podem ter um efeito significativo nos resultados da sua resistência tênsil. Entretanto, não há um consenso quanto à padronização da umidade de agregados de solo para ensaios de sua ruptura, mas é necessário que todos estejam em equilíbrio a uma determinada temperatura durante estes ensaios.

Essa uniformização pode ser feita ao ar (KAY; DEXTER, 1992) ou por meio de estufa: à 30 °C por 24 h, com circulação de ar forçada (ROGOWSKI; MOLDENHAUER; KIRKHAM, 1968); à 40 °C por 48 h, no caso de agregados confeccionados a partir de cilindros (CHAN; SIVAPRAGASAM, 1996; BREUER; SCHWERTMANN, 1999). Tormena, Fidalski e Rossi Junior (2008) adotaram o procedimento de homogeneização da umidade dos agregados em duas etapas, iniciando a secagem ao ar por 36 h e finalizando-a em estufa, a 60 °C por 24 h. Outros trabalhos avaliam o efeito da umidade na resistência tênsil de agregados equilibrados em

diferentes tensões de água (CHAN, 1995; MUNKHOLM; KAY, 2002; WHALLEY et al., 2005; BLANCO-CANQUI; LAL; SHIPITALO, 2007).

A resistência tênsil de agregados pode ser determinada por meio de ensaios diretos e indiretos (GUÉRIF, 1988), sendo os métodos diretos menos usados em pesquisas com solos, devido à dificuldade de obtenção da medida da força de tração (MUNKHOLM; KAY, 2002). Os métodos indiretos são os mais difundidos (ROGOWSKI; MOLDENHAUER; KIRKHAM, 1968; DEXTER, 1975; DEXTER; KROESBERGEN, 1985; GUÉRIF, 1988) e são assim chamados porque o estresse não é aplicado diretamente ao agregado. Em vez disso, uma força compressiva é aplicada no plano vertical do centro da amostra (cilíndrica, esférica ou semi-esférica) por meio de placas paralelas. Durante o ensaio, a força aplicada aumenta lentamente até aparecer uma fissura no centro geométrico da amostra, no sentido de cima para baixo. A resistência tênsil é, portanto, igual ao valor do estresse tênsil no momento da quebra da amostra (DEXTER; WATTS, 2000).

A forma do agregado é muito importante em ensaios para determinação da sua resistência tênsil (ÖZTAS; SÖNMEZ; CANBOLAT, 1999). A diversidade na forma do agregado é uma das principais fontes de variação da força aplicada para promover a sua ruptura (DEXTER; KROESBERGEN, 1985). Em geral, as pesquisas assumem que o agregado submetido à ruptura tem forma esférica (ROGOWSKI; MOLDENHAUER; KIRKHAM, 1968). Assim, cálculos para resistência tênsil de agregados dependem da sua forma e, conseqüentemente, de suas dimensões. No caso de agregados preparados artificialmente, onde amostras de solo desestruturadas adquirem forma cilíndrica após moldagem em discos ou cilindros, o cálculo da sua resistência tênsil é obtido pela eq. (1), conforme sugerido por Dexter e Kroesbergen (1985).

$$Y = \frac{2F}{\pi D l} \quad (1)$$

sendo: Y a resistência tênsil (Pa); F a força de carga para quebrar o agregado (N); D e l são o diâmetro (m) e a altura (m) do disco de solo.

Quando a forma original das amostras é mantida, como no caso de agregados, suas dimensões são obtidas a partir da separação dos agregados em peneiras, com aberturas das malhas pré-definidas. Neste caso, Dexter e Kroesbergen (1985) sugerem o cálculo da resistência tênsil ($Y_{\max}$) a partir do diâmetro efetivo do agregado, proposto por Watts e Dexter (1998), por meio da eq. (2), expressa em Pa.

$$Y_{\max} = 0,576 \times \left(\frac{P}{D^2} \right) \quad (2)$$

sendo: 0,576 o valor da constante de proporcionalidade da relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P a força aplicada no ponto de fratura do agregado (N); D o diâmetro efetivo de cada agregado (m). Detalhes em relação ao valor da constante de proporcionalidade (0,576) são apresentados em Guérif (1988).

Considerando que a densidade dos agregados é constante, o diâmetro efetivo, sugerido por Watts e Dexter (1998) é calculado pela eq. (3):

$$D_{\text{efetivo}} = D_m \cdot \left(\frac{M}{M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

sendo: D_m é o diâmetro médio dos agregados (mm), calculado pela média entre os valores das aberturas das malhas das peneiras utilizadas na separação dos agregados; M é a massa do agregado seco (g) a 105 °C e M_0 é a massa média dos agregados (g).

Uma grande diversidade de equipamentos tem sido proposta para obtenção da força máxima de ruptura dos agregados. Rogowski, Moldenhauer e Kirkham, (1968) utilizaram um equipamento (Figura 1a) com duas placas paralelas, colocando-se agregados entre elas para ensaios de ruptura. A placa inferior, movida por um motor elétrico, desloca-se de baixo para cima até que o agregado toque na superior e ocorra a sua ruptura, onde a força máxima é registrada por um dinamômetro (relógio interno). Outro relógio, externo, fornece a distância entre o toque do agregado na placa superior e sua ruptura, medindo a deformação do agregado durante o ensaio. Sua limitação está na aquisição e registro de dados, realizados de modo analógico; portanto, sujeito a erros sistemáticos em função do operador do equipamento.

Guérif (1990) usou um aparato automatizado em que os agregados, confeccionados e moldados em formato esférico, eram rompidos por meio do deslocamento de um atuador linear de cima para baixo, à velocidade constante de $4,33 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ (Figura 1b). Este equipamento possui como vantagem a conversão das leituras de força em sinais digitais, podendo ser processadas em data logger e/ou microcomputadores, melhorando a qualidade dos resultados de resistência tênsil. Porém, sua principal limitação é possuir um transdutor de força que suporta apenas cargas axiais de até 5 N.

Öztaş, Sönmez e Canbolat (1999) usaram um instrumento mais simples, propondo um penetrômetro de bolso adaptado para medição da força máxima na quebra de agregados. Sua

limitação se resume nas incertezas das leituras realizadas em sua escala (Figura 1c). Outros detalhes de equipamentos usados na determinação da resistência tênsil de agregados são vistos em Richards (1953), Mullins e Panayiotopoulos (1984), Guérif (1988), Causarano (1993), Rahimi, Pazira e Tajik (2000) e Urbanek e Horn (2006).

Figura 1 - Instrumentos para a medida da força máxima para quebra de agregados. Adaptada de: a) Rogowski, Moldenhauer e Kirkham, (1968); b) Guérif (1990); c) Öztas, Sönmez e Canbolat (1999)

Os equipamentos comentados anteriormente fornecem a força máxima de ruptura dos agregados, mas a precisão e exatidão dos resultados de resistência tênsil são comprometidas diante das limitações de cada instrumento, como: modo de aplicação da carga (variação da velocidade de deslocamento); visualização do momento exato de ruptura do agregado; leitura da força máxima (escala usada) e tempo do ensaio. Diante dessas limitações, o uso de alguns instrumentos tem como objetivo apenas a comparação qualitativa das forças relativas à ruptura de cada agregado, avaliadas pelo efeito de diferentes tamanhos e formas dos agregados (ÖZTAS; SÖNMEZ; CANBOLAT, 1999).

O equipamento sugerido em Imhoff, Silva e Dexter (2002) tem sido utilizado de forma satisfatória e tomado como padrão em recentes pesquisas (GIAROLA et al., 2003; LIMA et al. 2005; TORMENA; FIDALSKI; ROSSI JUNIOR, 2008). Este instrumento, detalhadamente descrito em Imhoff, Silva e Dexter (2002), apesar da exatidão e reprodutibilidade dos resultados, tem alto custo de aquisição ($\cong$ R\$ 25.000,00), que envolve computador e placas de aquisição de dados, além da necessidade de maior espaço em laboratório para sua instalação.

A busca da redução de custo nos ensaios de resistência tênsil de agregados tem motivado pesquisas para instrumentos alternativos aos tradicionalmente usados, com mesma eficácia, baixo custo e menor tempo de ensaio. Um instrumento que preenche estes requisitos é o dinamômetro modelo Lutron FG-20 KG, que tem sido utilizado como equipamento alternativo ao proposto por Imhoff, Silva e Dexter (2002).

2.1.1.2 Densidade do solo

Segundo Libardi (2005), o termo densidade se refere à massa que o volume de um determinado corpo possui. A densidade do solo é definida, assim, pela razão entre massa de sólidos e volume do solo (volume de sólidos mais espaço poroso). É também referida como densidade de solo seco (BLAKE; HARTGE, 1986; LAL; SHUKLA, 2004). Normalmente, é expressa como unidade do Sistema Internacional (Mg m^{-3}); mas, muitas vezes são utilizadas unidades alternativas, incluindo t m^{-3} ou g m^{-3} , que são equivalentes numericamente (CRESSWELL; HAMILTON, 2002; CHAN, 2006; BRADY; WEIL, 2008).

É uma das mais importantes propriedades do solo, considerada como um dos indicadores da qualidade física de um solo, sendo amplamente utilizada para avaliar outras propriedades do solo (MACYK; RICHENS, 2004; CHAN, 2006). Por exemplo, a densidade de agregados é usada para estimar a porosidade inter-agregados e, juntamente com o tamanho de agregado, influencia o crescimento vegetativo (DE FREITAS; ZOBEL; SNYDER, 1996). O balanço hídrico, a disponibilidade de nutrientes e o sequestro de carbono são exemplos de outras propriedades que podem ser estimadas a partir da densidade do solo (KISHNÉ et al., 2007). Teoricamente sua determinação é relativamente simples (massa de solo seco/volume total). Entretanto, na prática, desde os métodos pioneiros, o maior desafio ressaltado pelos pesquisadores é a determinação do volume total do solo, fator crucial na exatidão dos resultados (TERRY; CASSEL; WOLLUM, 1981; MACYK; RICHENS, 2004).

Vários métodos têm sido propostos para medir a densidade do solo, podendo ser classificados de acordo com o princípio envolvido, o que basicamente leva a dois grupos. O primeiro, que requer a remoção de um volume conhecido de solo estruturado, resume-se a três métodos: o do cilindro (ou anel) volumétrico (UHLAND, 1949; BLAKE, 1965; GODDARD; RUNGE; WALKER, 1971; BLAKE; HARTGE, 1986; PRIKNER; LACHNIT; DVOŘÁK,

2004); do torrão (SHAW, 1917; PERRY, 1942; McINTYRE; LOVEDAY, 1974; SARLI; FILGUEIRA; GIMÉNEZ, 2001; GROSSMAN; REINSCH, 2002; KROSLEY; LIKOS; LU, 2003; SANDER; GERKE, 2007); e o da escavação (ISRAELSEN, 1918; FREAR; ERB, 1920; CURRY, 1931; LUTZ, 1944; SHIPP; MATELSKI, 1965; FLINT; CHILDS, 1984; MULLER; HAMILTON, 1992; HIRMAS; FURQUIM, 2006). O segundo grupo é representado por aqueles métodos que envolvem o uso de radiação nuclear, como atenuação de raios gama (VOMOCIL, 1954; VAN BAVEL; UNDERWOOD; RAGAR, 1957; GARDNER, 1965; BENJAMIN; CRUSE, 1985; TIMM et al., 2005).

A escolha do método mais apropriado deve ser baseada em suas limitações diante de solos com diferentes graus de arrançamento de partículas (TERRY; CASSEL; WOLLUM, 1981). Comumente, solos de textura mais grossa (arenosos) apresentam possibilidades diminutas de arrançamento de suas partículas, enquanto que os de textura fina (mais argilosos), maiores (COSTA et al., 2002). Dessa forma, a seleção do método depende da textura e estrutura do solo, exigindo um método distinto para cada situação. Por exemplo, para solos argilosos, sem excessos de frações grosseiras (cascalhos, calhaus) ou material vegetal, o método do torrão é o mais apropriado (ELLIOTT et al., 1999). Neste método, a massa do solo é obtida diretamente por simples pesagem do agregado do solo e o seu volume total é determinado pelo deslocamento de um líquido (geralmente água), promovido pelo agregado impermeabilizado por substâncias como parafina ou resina.

A parafina foi uns dos primeiros produtos a ser usado como revestimento de agregados na determinação da densidade de solos. Segundo Shaw (1917), data de 1908 os primeiros registros de uso da parafina em revestimentos, sendo originalmente denominado de “método de imersão na parafina”. O autor comenta que uma breve descrição deste método foi publicada em Brown, MacIntire e Cree (1910)¹ e métodos similares foram propostos por Stevenson (1908)² e Trnka (1914)³. Porém, a maioria das publicações se reporta a Shaw (1917) como o método pioneiro de revestimento de agregados de solos usando a parafina.

¹ BROWN, B.E.; MacINTIRE, W.H.; CREE, W.F. Comparative physical and chemical studies of five plats, treated differently for twenty-eight years. **Annual Report Pa. Agricultural Experiment Station 1909-1910**, p. 96-97, 1910.

² STEVENSON, W.H. **A new soil sampler**. Ames: Iowa Agricultural Experiment Station, 1908. 31 p. (Bulletin, 94).

³ TRNKA, R. **Eine Studie uber einige physikalischen Eigenschaften des Bodens**. Internat. Mitt. Fur Bodenkunde, bd. 4, heft 4/5, p. 363-387, 1914.

Além de utilizar amostras indeformadas, o método do torrão tem outra vantagem: padronizar a umidade das amostras, podendo-se correlacionar a umidade atual do solo com sua densidade (GROSSMAN; REINSCH, 2002). Este método se baseia na determinação da massa (seca a 105 °C, 24 h) e volume do torrão, o qual é revestido por uma substância impermeável, tal como parafina ou resina, e imerso em água para obtenção do volume por deslocamento, pelo princípio de Arquimedes (BLAKE; HARTGE, 1986).

Quase 60 anos após o inovador “método de imersão na parafina” surgiu uma nova proposta: a resina saran (Dow, saran F-310 resin). Brasher et al. (1966) foram os primeiros a proporem o uso desta resina como revestimento de torrão na determinação de sua densidade. Historicamente, este método foi sugerido para medir a extensibilidade linear de solos (CALHOUN et al., 2001). Nas últimas décadas, esse método vem sendo adaptado e o proposto por Grossman e Reinsch (2002) tem sido utilizado em estudos recentes (PERFECT et al., 2004; EYNARD et al., 2006; AGNELLI et al., 2007; BLANCO-CANQUI; LAL; SHIPITALO, 2007; VULAVA et al., 2007) e sugerido com método padrão, razão pela qual foi escolhido como referência neste estudo. Neste método há necessidade da dissolução da resina em solvente orgânico (acetona ou metil etil ketona, menos solúvel em água) em proporções 1:4 e 1:7 (resina: diluente). Este procedimento, bem como todo processo de revestimento de agregados (três imersões), aumenta o tempo de análise. Há também alguns aspectos relativos à saúde que devem ser considerados, como a liberação de vapores orgânicos (resina-acetona ou metil etil ketona), que promovem irritações de olhos e de garganta (KROSLEY; LIKOS; LU, 2003). Isto exige que todo o processo de revestimento seja realizado em câmara com exaustão (capela) ou em ambiente bem ventilado. Contudo, o principal problema deste método é a limitação do uso da resina saran F-310, uma vez que há dificuldades para obtê-la, pois não consta mais do catálogo de seu único fabricante (Dow Chemical Company, Midland-MI). Passados 100 anos do clássico “método de imersão na parafina”, poucos trabalhos são encontrados na literatura propondo revestimentos alternativos que não o da resina saran.

No Brasil, o revestimento tradicionalmente mais usado para impermeabilização de agregados do solo é a parafina e o método é comumente denominado de torrão parafinado (EMBRAPA, 1997). Silva et al. (2003) propuseram modificações na marcha analítica deste método, substituindo a parafina pela cera de abelha. Entretanto, estas devem ser mantidas no estado líquido (aproximadamente 60 °C), para serem eficientes como revestimentos de agregados

de solos. Assim, torna-se necessário o uso de placa aquecedora ou similar, um inconveniente em análise de rotina, sendo a temperatura um fator crítico na precisão dos resultados. Pequenas variações na temperatura de manutenção do ponto de fusão destes revestimentos podem reduzir sensivelmente a exatidão das determinações de densidades. Acima de 60 °C estes revestimentos ficam mais susceptíveis a penetrar nos poros do agregado (AUSTRALIA. Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources - DIPNR, 2003), promovendo a expansão do ar internamente e causando fraturas no agregado (CRESSWELL; HAMILTON, 2002). Com a entrada do revestimento nos poros, aumentando a pressão interna dos gases do solo, pequenas bolhas de ar atravessam o revestimento (ainda no estado líquido), que mesmo após a sua solidificação na superfície do agregado, os gases do solo ainda continuarão a se expandir (BLAKE, 1965). Podem ocorrer ainda erros na quantificação do volume do agregado devido a lacunas de gases que podem surgir entre as depressões do agregado e o revestimento (ABROL; PALTA, 1968). Quando a temperatura do revestimento está abaixo de 60 °C, este pode formar uma camada mais espessa durante o processo de impermeabilização do agregado. Isto poderá ocorrer mesmo na temperatura indicada, conforme observado por Vincent e Chadwick (1994), que encontraram espessura do revestimento com aproximadamente 4 mm.

Um material para ser considerado como revestimento ideal de agregado deve apresentar distribuição uniforme em toda a superfície do solo, formando uma película delgada e impermeável à água, além de ausência ou reduzida toxicidade. Estas condições tornam limitante a escolha de substâncias a serem usadas como seladoras, principalmente se em solos coesos, os quais esboroam facilmente em contato com a água, exigindo um perfeito recobrimento.

No método proposto nesta tese, o verniz automotivo Lazzudur 7502 (Sherwin-Williams, Ohio) apresenta características mais apropriadas para ser usado como revestimento de agregado: é líquido à temperatura ambiente; pronto para uso, sem a necessidade de adição de outros produtos (solventes ou outros pré-tratamentos), além de rápida secagem após sua aplicação.

2.1.1.3 Análise Granulométrica de Solos

O termo “análise mecânica de solos” foi introduzido na literatura no primeiro ano do século XIX (KRUMBEIN, 1932). Este termo é hoje conhecido como análise granulométrica de solos e pode ser definido como a distribuição do tamanho das partículas primárias de sua fase sólida,

baseada nos diâmetros equivalentes destas partículas. Aquelas menores que 2 mm são geralmente divididas em três frações: areia, silte e argila. Vários sistemas de classificação têm definido diferentes limites para estas frações (GEE; BAUDER, 1986).

Na escala sugerida pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos-USDA (adotada no Brasil), a fração areia tem diâmetro compreendido entre 2,00 e 0,05 mm, o silte de 0,05 - 0,002 mm e a argila $< 0,002$ mm (BAVER; GARDNER; GARDNER, 1972; TAN, 1996). É uma das mais comuns de todas as determinações em físicas de solos, freqüentemente utilizada na classificação textural de solos, curva de distribuição do tamanho das partículas (GEE; OR, 2002), cujos dados servem de base para estimar propriedades hidráulicas do solo (HWANG; POWERS, 2003; CHAKRABORTY et al., 2006). As funções de pedotransferência entre os tamanhos de partículas e a umidade obtida a partir da curva de retenção de água no solo evidenciam a estreita relação entre essas propriedades do solo (ARYA; PARIS, 1981; KELLER; GEE, 2006).

Uma grande variedade de técnicas em análise granulométrica de solos está disponível na literatura (McTAINSH; LYNCH; HALES, 1997). Cerca de 400 métodos são atualmente conhecidos (BARTH; SUN, 1985; LOVELAND; WHALLEY, 2000). Muitas destas técnicas estão resumidas em McCave e Syvitski (1991) e discutidas por outros autores em Syvitski (1991). Uma excelente revisão dos primeiros trabalhos sobre análise granulométrica de solos, incluindo sua história, princípios e métodos, está detalhada em Krumbein (1932), e, mais recentemente, em Miller, Radcliffe e Miller (1988). De modo geral, os diferentes métodos incluem: peneiramento; peneiramento combinado com sedimentação e métodos de sedimentação (RYŽAK; BIEGANOWSKI; WALCZAK, 2007), cujos procedimentos podem ser resumidos em três etapas: o pré-tratamento das amostras, para remoção de agentes cimentantes e flocculantes; dispersão das amostras e quantificação das frações do solo (GEE; BAUDER, 1986; MINASNY et al., 2007; CHAUDHARI; SINGH; KUNDU, 2008).

Na análise por peneiramento, as partículas de solo, após dispersão, são passadas em peneiras com malha quadrada de dimensões específicas; por exemplo, 53 μ m no caso da separação da areia das outras frações (BLOTT; PYE, 2006). Por outro lado, no método de sedimentação o tamanho das partículas é determinado com base na medida do seu tempo de queda num líquido. Dois destes métodos mais comumente usados são o da pipeta e o do densímetro (LIU et al., 1966; GEE; BAUDER, 1986; ELLIOTT et al., 1999).

Esses métodos consideram, via de regra, a sedimentação de partículas teoricamente esféricas e em regime de fluxo laminar (não turbulento), conforme sugere a Lei de Stokes (STOKES, 1851), usada para calcular a velocidade que as partículas em suspensão sedimentam. A partir desta velocidade, é calculado o tempo necessário para que uma partícula do solo de determinado diâmetro seja sedimentada. O material que permanece nessa suspensão aquosa pode ser quantificado de duas maneiras: por coleta de alíquotas (método da pipeta, micro-pipeta) ou a partir de sua densidade (método do hidrômetro) e, expresso em massa.

De acordo com Starr et al. (2000), um dos métodos mais tradicionais a usar a Lei de Stokes foi o de Casagrande (1934)⁴. Entretanto, uma abordagem mais precisa usando essa teoria é o método da pipeta, desenvolvido entre 1922 e 1923, publicado independentemente por Robinson (1922), Jennings, Thomas e Gardner (1922) e, Krauss (1923)⁵ apud Krumbein (1932).

Em 1926, este método tornou-se padrão para análises de rotina, devido à recomendação do subcomitê da “Agricultural Education Association” da Grã-Bretanha, após comparar diversos métodos para análise granulométrica de solos (COMBER et al., 1926). Atualmente, apesar da evolução tecnológica, que tem proporcionado o surgimento de novos equipamentos e métodos, o da pipeta ainda é mantido como referência na avaliação da precisão e exatidão de outros métodos (RYŻAK; BIEGANOWSKI; WALCZAK, 2007).

O método da pipeta consiste pipetar uma subamostra de um solo em suspensão aquosa mantida numa proveta de 1 L, após o tempo t de sedimentação, a uma profundidade h da suspensão abaixo da qual todas as partículas com diâmetro d maior que X encontram-se sedimentadas. Segundo a Lei de Stokes, o tempo t (s), que determina o momento da coleta da fração argila, a uma determinada temperatura, é dado por:

$$t = \frac{18 \eta_s h}{g (\rho_p - \rho_l) X^2} \quad (4)$$

sendo: η_s a viscosidade da solução em função da temperatura (g cm s^{-1}); h a profundidade de coleta (cm); ρ_p a densidade da partícula (g cm^{-3}); ρ_l a densidade da solução (g cm^{-3}); g a aceleração da gravidade (cm s^{-2}) e X o diâmetro da partícula (cm). A viscosidade (η_s) e densidade (ρ_l) da solução em função da temperatura são calculadas pelas eq. (5) e (6), respectivamente.

⁴ CASAGRANDE, A. **Die Araometer-Methode zur bestimmung der kornverteilung von boden und anderen materialien**. Berlin: Julius Springer, 1934.

⁵ KRAUSS, G. Ueber eine...neue methode der mechanischen bodenanalyse. **Mitt. Fur Bodenkunde**, v. 13, p. 147-160, 1923.

$$\eta_s = \eta_{\text{água}} (1 + 4,25 C_s) \quad (5)$$

$$\rho_l = \rho_{\text{água}} (1 + 0,63 \cdot C_s) \quad (6)$$

sendo: $\eta_{\text{água}}$ é a viscosidade da água; $\rho_{\text{água}}$ a densidade da água, ambas em função da temperatura, obtidas a partir de tabelas; e C_s , a concentração do dispersante químico (14 g L^{-1}).

A fração argila, sifonada pela pipeta, é seca em estufa e pesada. A fração areia, separada por peneiramento ($< 53 \mu\text{m}$), logo após a dispersão, é obtida gravimetricamente. O percentual de silte é calculado pela diferença: $100 - (\text{Areia} + \text{Argila}) \%$. Maiores detalhes podem ser encontrados em Day (1965), Gee e Bauder (1986), e, mais recentemente, em Gee e Or (2002).

Uma desvantagem do método pipeta é requerer uma quantidade substancial de tempo e mão de obra para execução da análise (TAN, 1996; MURRELL, 2006; GOOSSENS, 2008). O momento da coleta da subamostra pela pipeta, a uma determinada profundidade (10 cm), para determinar fração argila ($< 2 \mu\text{m}$) depende da temperatura da suspensão, que para 20°C exige pelo menos 8 h de sedimentação (BUCHAN et al., 1993; GEE; OR, 2002). Conseqüentemente, pesquisadores preferem utilizar o método do hidrômetro, mais rápido, principalmente quando se têm grande quantidade de amostras (INDORANTE et al., 1990).

O método do hidrômetro, também chamado de método de Bouyoucos, baseia-se no princípio da taxa de sedimentação ser proporcional ao tamanho da partícula de solo. Assim, as partículas de areia se sedimentam mais rapidamente que as de silte, que por sua vez se sedimentam mais rápido que as de argila (ELLIOTT et al., 1999). Um dos pioneiros a usar o hidrômetro para estimar a quantidade de sólidos em uma suspensão de solução de solo foi Bouyoucos (1927, 1951, 1962). Nestes métodos, as percentagens de areia, silte e argila são obtidas a partir de leituras no hidrômetro em 40 s, 4 min e 2h, respectivamente. Desses métodos, o sugerido por Bouyoucos (1962) ainda é muito utilizado atualmente em análises de rotina por várias universidades e institutos de pesquisas. Este se baseia em apenas duas leituras no hidrômetro (40 s e 2 h). Segundo Walter, Hallberg, e Fenton (1978), tanto o método do densímetro como o da pipeta, se forem seguidos os procedimentos de pré-tratamento das amostras, fornecem resultados comparáveis.

O hidrômetro recomendado pela “American Society for Testing and Materials” (ASTM), tido como padrão, é o modelo nº 152H, com escala de Bouyoucos em g L^{-1} (Figura 2). Este instrumento fornece, em determinado tempo, uma leitura que tem relação direta com uma dada

profundidade linear efetiva de leitura, a qual varia em função da densidade das partículas sólidas em suspensão. Portanto, a partir da Lei de Stokes, é possível calcular o diâmetro médio das partículas em uma suspensão de solução de solo.

Figura 2 - Diagrama esquemático do hidrômetro da ASTM, modelo 152 H

Apesar de muito utilizado, esse método não é recomendado por alguns autores devido aos erros nas estimativas dos conteúdos de areia e argila (GEE; BAUDER, 1979; ASHWORTH et al., 2001). Bohn e Gebhardt (1989) ratificam esta desvantagem ao afirmarem que os problemas deste método se relacionam aos diferentes tempos de leituras na determinação das frações do solo. A validade do método de Bouyoucos (1962) foi também questionada por Gee e Bauder (1986), os quais argumentaram que os tempos de sedimentação adotados empiricamente eram incompatíveis com as exigências da teoria de sedimentação. Estes autores observaram que leituras efetuadas aos 40 s, subestimam em 5 % a fração areia quando se compara com o percentual obtido gravimetricamente, após lavagem e pesagem da areia retida em peneira com abertura de 53 μm . Com relação à fração argila, determinada pela leitura de 2 h, seu valor pode exceder em 10 % ou mais que o real (MILLER; RADCLIFFE; MILLER, 1988; GEE; BAUDER, 1979).

Gee e Or (2002) propuseram um método mais completo utilizando hidrômetro e baseado em adaptações da metodologia sugerida por Day (1965), a qual foi modificada por Gee e Bauder (1986) e American Society for Testing and Materials - ASTM (2000). Segundo os autores, este

método permite medições não destrutivas da suspensão da solução do solo que contém as frações granulométricas em processo de sedimentação. São realizadas medidas nessa suspensão em nove intervalos de tempo pré-determinados (0,5; 1; 3; 10; 30; 60; 90; 120 e 1440 min), permitindo-se quantificar detalhadamente a distribuição dos tamanhos das partículas. Os autores ainda sugeriram algumas adaptações nesse método, que incluem a redução das leituras, originando o “método do hidrômetro com quatro leituras” (0,5; 1; 90 e 1440 min), mais simples e rápido. Apesar do método do hidrômetro reduzir o tempo de análise quando comparado com o da pipeta, ainda não é suficientemente rápido para análises de rotina (SUR; SINGH; MAHLI, 1977).

Sob a perspectiva científica, o tempo de duração da análise é um fator menos importante quando comparado com a reprodutibilidade dos resultados. Entretanto, isto pode ser significativo em análises de rotina (GOOSSENS, 2008). Ainda, a redução do tempo de análise tem sido foco de várias pesquisas (WELCH; ALLEN; GALINDO, 1979; COOPER; HAVERLAND; HENDRICKS, 1984; SUR; KUKAL, 1992; ADIKU et al., 2004; ESHEL et al., 2004; CHAUDHARI; SINGH; KUNDU, 2008).

Indorante et al. (1990), estudando o método da pipeta, propuseram uma adaptação no método descrito em Day (1965), similar ao Gee e Bauder (1986). No novo procedimento, a dispersão e a coleta da fração argila (pipeta volumétrica) são realizadas no mesmo recipiente, denominado pelos autores de Fleaker, que é um frasco de vidro com capacidade para 500 mL, com tampa de borracha, originado da combinação do béquer e erlenmeyer, primeiramente desenvolvido por Follmer (1970)⁶. Os autores concluíram que a nova metodologia reduziu o tempo de análise em 2 h, aumentando em até 48 % a quantidade de amostras analisadas.

Além do método da pipeta (GEE; OR, 2002), existem outros métodos que não utilizam o densímetro para quantificação das frações granulométricas. Dentre eles, citam-se os métodos da micro-pipeta (MILLER; MILLER, 1987; BURT; REINSCH; MILLER, 1993) e o método rápido de Kettler, Doran e Gilbert (2001). Nestes métodos, o material que permanece em uma suspensão de solução de solo, a uma dada profundidade, pode ser quantificado por pesagem, a partir de alíquotas coletadas em determinado tempo de sedimentação, também baseados na Lei de Stokes.

No método da micro-pipeta proposto por Miller e Miller (1987), tanto a fração areia (retida na peneira com malha de 53 μ m) como a argila (pipetada a uma profundidade de 2,5 cm) são obtidas por pesagem. O método sugerido em Burt, Reinsch e Miller (1993) é similar ao proposto

⁶ FOLLMER, L.R. **Soil distribution and stratigraphy in the Mollic Albaqualf region of Illinois**. Dissertation (Ph. D) - University of Illinois, Urbana, 1970. (Dissertation Abstracts, v. 71-5096),

por Miller e Miller (1987), exceto pela não adição do dispersante, nem remoção da matéria orgânica e sais solúveis. Portanto, este método não determina a argila total e, sim, a “argila dispersa em água”, assim denominado este método pelos autores.

Um método simples, rápido e relativamente econômico desenvolvido por Kettler, Doran e Gilbert (2001), denominado como “método rápido”, é considerado uma alternativa viável ao método da pipeta (CHAUDHARI; SINGH; KUNDU, 2008). Este método se diferencia dos demais quanto à determinação das frações argila e silte. Depois de calculado o tempo de sedimentação do silte, a fração argila é extraída por sucção, descartada e calculada por diferença, enquanto que as frações areia e silte são determinadas por pesagem.

O progresso tecnológico em eletrônica nos últimos anos permitiu o uso de novos métodos para análise granulométrica, tais como o método de difração a laser (COOPER; HAVERLAND; HENDRICKS, 1984; BUURMAN; PAPE; MUGGLER, 1997; KONERT; VANDENBERGHE, 1997; BEUSELINCK et al., 1998), atenuação de raios X (BUCHAN et al., 1993; BORKOVEC et al., 1993), atenuação de raios gama (KARSTEN; KOTZE, 1984; OLIVEIRA et al., 1997; ELIAS; BACCHI; REICHARDT, 1999), e espalhamento estático e dinâmico da luz (WU; BORKOVEC; STICHER, 1993). Apesar deles possuírem elevada importância acadêmica, não se tornaram populares nos laboratórios de análises de solos, principalmente devido aos custos envolvidos (RYŽAK; BIEGANOWSKI; WALCZAK, 2007; CHAUDHARI; SINGH; KUNDU, 2008).

A despeito desta evolução tecnológica, o método da pipeta ainda é considerado padrão para análises de rotina. Conseqüentemente, a seleção dos métodos é realizada em função da equivalência de seus resultados com aqueles obtidos pelo método da pipeta. Pode-se afirmar que não há um método que seja considerado como padrão universal para análise granulométrica de solos, uma vez que todos, sejam clássicos ou novos, estão sujeitos a alguma fonte de erro. Dessa forma, conclui-se que a escolha do método dependerá da avaliação das vantagens e desvantagens de cada um deles (ESHEL et al., 2004).

A análise granulométrica de solos é muito utilizada para estimar algumas de suas propriedades hidráulicas, entre elas a curva de retenção de água (ARYA; PARIS, 1981; HWANG; POWERS, 2003). As funções de pedotransferência entre os tamanhos de partículas e a umidade obtida a partir da curva de retenção de água no solo, evidenciam a estreita relação entre essas propriedades (ARYA; PARIS, 1981; KELLER; GEE, 2006; GHANBARIAN; LIAGHAT, 2007). O conhecimento da função da fração argila no solo não é recente, especialmente em

relação a sua atividade na adsorção e fornecimento de água às plantas (ALBRECHT; McCALLA, 1937). Salter, Berry e Williams (1966) estudando a influência da textura na umidade do solo, concluíram que a capacidade de água disponível do solo é inversamente proporcional ao percentual de areia grossa e diretamente proporcional ao percentual de partículas finas.

Para os ajustes entre a fração argila e a umidade do solo correspondente à tensão 1500 kPa, realizou-se a curva de retenção de água no solo. Esta determinação geralmente é obtida utilizando-se os métodos da mesa de tensão e das câmaras de pressão de ar com placa porosa (KLUTE, 1986). Nestes, o equilíbrio da água na amostra para cada tensão aplicada depende de propriedades do solo como a textura e a estrutura, entre outras. Os potenciais são fixados (pressão de ar ou altura de coluna de água), determinando a umidade após o equilíbrio, o qual é muito lento, necessitando de vários dias, ou até semanas, para a obtenção da curva (GEE et al., 2002).

Uma proposta alternativa para redução desse período é o uso do Dew Point Potentiometer ou Water Potential Meter (WP 4) fabricado pela Decagon Devices, Inc. A versão mais atual deste instrumento (WP4-T) vem equipada com um sensor de temperatura, que otimiza seu funcionamento em termos de regulação de sua temperatura interna (Figura 3a). Este equipamento mede o potencial da água retida no solo quando ocorre o equilíbrio entre a pressão de vapor de saturação na amostra (P_o) e pressão de vapor do ar na câmara de leitura (P) (Figura 3b). Com os valores de P_o e P , o sistema calcula o potencial (Ψ) por meio da equação de Kelvin (Figura 3c), na qual: R é a constante universal dos gases (8.31 J/mol K); T é a temperatura (Kelvin) da amostra e M a massa molecular da água. A leitura do potencial de água por amostra de solo é obtida rapidamente (≤ 5 min) e permite a determinação da curva de retenção da água no solo em poucas horas (SCANLON; ANDRASKI; BILSKIE, 2002).

Figura 3 - Water Potential Meter (a), com vista da parte interna e detalhes da câmara de leitura (b), equação para estimar a energia da água retida no solo (c)

2.1.2 Uso de condicionadores químicos em solos

O conceito de condicionadores envolve a aplicação de produtos químicos aos solos para modificar favoravelmente suas propriedades físicas. A natureza destes produtos é muito variável e engloba desde materiais naturais orgânicos (húmus) e inorgânicos (principalmente sais de cálcio) até produtos sintéticos industrializados, como polímeros (SCHAMP; HUYLEBROECK; SADONES, 1975). Um dos condicionantes naturais do solo mais conhecido é a matéria orgânica. Oades e Waters (1991) confirmaram que em solos com argila 2:1 a matéria orgânica é o mais importante agente cimentante, devido aos complexos polivalentes de material metal-orgânico formar ligações entre cargas negativas da matéria orgânica do solo e plaquetas de argila 2:1.

Um produto usualmente adicionado ao solo como condicionante é o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o qual é considerado mais eficiente que o carbonato de cálcio devido sua alta solubilidade. Deste modo, o gesso é dissolvido no solo de 2 a 4 vezes mais rápido, devido o Ca^{2+} se mover para as superfícies de troca (OSTER; TANJI, 1985). Já o cloreto de cálcio ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é mais solúvel que o gesso; no entanto, seu uso normalmente é antieconômico (MAGDOFF; BRESLER, 1973). Naturalmente, o gesso pode ser encontrado em solos de regiões áridas e semi-áridas. Os íons sulfato estão presentes na solução do solo e podem ser adsorvidos pelos minerais das partículas de argila e óxidos de ferro e alumínio, especialmente em solos ácidos (HARWARD; REISENAUER, 1966). Sua aplicação melhora as características físicas do solo, especialmente o tamanho dos agregados, reduz os valores de argila dispersa em água, induzindo aumentos no grau de floculação (ROSA JUNIOR et al., 2006). Em solos afetados por sódio, o gesso reduz o selamento superficial, aumentando a taxa de infiltração de água no solo (MALIK; AMRHEIN; LETEY, 1991). Porém, quando o gesso é aplicado conjuntamente com polímeros esse efeito tem sido potencializado (ZAHOW; AMRHEIN, 1992; SHAINBERG; WARRINGTON; RENGASAMY, 1990; SIVAPALAN, 2002; TANG et al., 2006).

Muitos autores têm mostrado os efeitos positivos da aplicação de condicionadores químicos na melhoria das condições físicas do solo (HAISE; JENSEN; ALESSI, 1955; DESMET; GABRIELS; DIERICKX, 1985; CHARTRES; KIRBY; RAUPACH, 1990; CHAN; SIVAPRAGASAM, 1996; BREUER; SCHWERTMANN, 1999; TEO; RAY; EL-SWAIFY, 2006; SIVAPALAN, 2006; BUSSCHER; NOVAK; CAESAR-TONTHAT, 2007). Embora vários produtos testados tenham se mostrado eficientes como condicionadores do solo, alguns

polímeros eventualmente não apresentam vantagens para o uso agrícola. Várias dificuldades podem ser relacionadas a este fato, entre elas: alto custo, dificuldade de incorporação, formação de camadas impermeáveis e o conceito errôneo de que estes produtos poderiam recuperar um solo desestruturado ao invés de simplesmente estabilizar os agregados já existentes ou, algumas vezes, reforçar o grau de compactação das camadas de solo (RUSSELL, 1988).

Polímeros são definidos como compostos químicos de alto peso molecular, resultantes de reações químicas (polimerização) de unidades moleculares fundamentais (monômeros), que geram macromolécula natural ou sintética, produzidas em laboratório. Os polímeros sintéticos são os mais usados na agricultura. (SCHAMP; HUYLEBROECK; SADONES, 1975). Estes podem ser classificados quanto ao seu tipo de carga, sendo sintetizados como: neutros, catiônicos e aniônicos, e deste dependerá a sua adsorção e eficácia como condicionante de solos (HELALIA; LETEY, 1988). Os polímeros aniônicos são mais efetivos na melhoria da resistência de agregados à erosão do que os catiônicos (LEVY et al., 1992), que, apesar de eficientes floclulantes, são tóxicos ao meio ambiente e seu uso tem sido extremamente limitado (BARVENIK, 1994), como os neutros, também de uso restrito (SOJKA; SURAPANENI, 2000).

A forma de aplicação dos polímeros também tem interferido na eficiência destes condicionadores. No estado sólido, podem ser aplicados diretamente na superfície do solo, otimizando os índices de germinação em solos compactados ou erodidos. Outro modo de aplicação é a sua incorporação nas camadas subsuperficiais, que tem se tornado a maior dificuldade para seu uso na agricultura (RUSSELL, 1988). Polímeros podem ser aplicados diretamente na água de irrigação: por sulcos, em pesquisas mais antigas; e por aspersão, nas mais recentes, devido aos seus efeitos no aumento da infiltração e na diminuição da perda de solo (MADEIRA et al., 2000). Também são usados compressores para sua aplicação no campo, pulverizando-o na superfície do solo (GREEN et al., 2000). Em laboratório, há vários modos de aplicação: capilaridade (CHAN; SIVAPRAGASAM, 1996), gotejamento direto nos agregados (ALY; LETEY, 1989), pulverização (BUSSCHER; NOVAK; CAESAR-TONTHAT, 2007), ou lançado (quando no estado sólido) diretamente na superfície do solo (NISHIMURA et al., 2005).

Além do tipo de cargas, duas outras propriedades são tidas como as mais importantes para eficiência do polímero: a densidade de carga e o peso molecular (LEVY; AGASSI, 1995). Na maioria das pesquisas, o polímero mais comumente usado é o aniônico, com baixa densidade de carga e alto peso molecular (SHAINBERG; WARRINGTON; RENGASAMY, 1990; SMITH;

LEVY; SHAINBERG, 1990; LEVIN et al., 1991; LEVY et al., 1992), que atuam estruturando o solo, controlando a erosão, melhorando a infiltração de água e ajudando na recuperação de solos salinos (WALLACE; WALLACE; ABOUZAMZAM, 1986; WALLACE; WALLACE, 1986; SHAINBERG; LEVY, 1994). Dentre estes, a poliacrilamida (PAM), formada a partir da polimerização de monômeros de acrilamida (Figura 4), tem sido o mais usado. Pesquisas com o uso do PAM como condicionador de solo iniciaram-se em 1950 (BARVENIK, 1994). Comparado aos primeiros polímeros usados nesta época, como por exemplo o Krilium[®], a nova geração de polímeros tem peso molecular mais elevado e maior solubilidade em água (CHAN; SIVAPRAGASAM, 1996; SOJKA; LENTZ, 1994), requerendo baixas taxas de aplicação (SIVAPALAN, 2006).

Figura 4 - Estrutura química de monômeros de acrilamida e da poliacrilamida

Poucos são os estudos realizados com os polímeros no Brasil que têm dado ênfase ao uso de polímeros denominados hidroabsorventes (PREVEDELLO; BALENA, 2000; BUZETTO; BIZON; SEIXAS, 2002; OLIVEIRA et al., 2004; AZEVEDO et al., 2002; VALE; CARVALHO, PAIVA, 2006). Estes polímeros não reagem com os constituintes do solo, mas exercem efeito direto, aumentando a retenção de água no solo (NIMAH; RYAN; CHAUDHRY, 1983).

Também chamados de hidroretentores, estes polímeros são produtos naturais (derivados do amido) ou sintéticos (derivados do petróleo), que são valorizados por sua capacidade de adsorver e armazenar água (MORAES, 2001). Eles não são solúveis em água, mas altamente hidrofílicos, formando um gel capaz de adsorver grandes quantidades de água ou soluções aquosas, absorvendo de 1000 a 2000 vezes o seu peso em água (SOJKA; ENTRY; ORTS, 2005). Quando secos esses polímeros apresentam-se em forma granular, quebradiços; porém, tornam-se macios e

elásticos quando hidratados. Segundo Johnson (1984), a maior parte da água armazenada nestes polímeros fica disponível em tensões relativamente baixas. Entretanto, há carência em metodologias com relação ao uso de outros tipos de polímeros, principalmente em solos com horizontes coesos, para redução deste caráter nestes solos quando secos.

Os solos coesos localizam-se na faixa dos Tabuleiros Costeiros no Brasil, constituindo uma área com grande potencial agrícola. Sua limitação para o cultivo está diretamente relacionada ao impedimento do desenvolvimento radicular das plantas. Giarola e Silva (2002), avaliando as similaridades entre estes solos e àqueles identificados como hardsetting na Austrália, concluíram que existem muitas semelhanças quanto à ocorrência e características químicas, mineralógicas e físicas, como o incrementos da resistência tênsil.

A resistência tênsil do solo é controlada por vários fatores, incluindo cátions absorvidos, conteúdos de água e de argila dispersa (UTOMO; DEXTER, 1981). Levy e Rapp (1999) têm afirmado a falta de pesquisa com relação ao efeito da aplicação de polímero na resistência de agregados na camada superficial de solos. Aly e Letey (1989) comparando o efeito de polímeros na redução do caráter coesos de solos, concluíram que a aplicação de polímeros reduz a força coesiva dos solos quando secos, e que este efeito é dependente do tipo do polímero aplicado, da qualidade da água usada e do tipo de solo.

Na Austrália, tem se destacado os efeitos da aplicação dos PAM's aniônicos na redução da resistência tênsil de agregados de solos hardsetting e no aumento de sua retenção de água (CHAN; SIVAPRAGASAM, 1996; RAINE; ALLEN, 1998; VACHER, 1999; SOJKA; SURAPANENI, 2000; SIVAPALAN, 2002). Chan e Sivapragasam (1996) avaliaram o efeito da aplicação de um polímero aniônico na estrutura e nas propriedades físicas de um solo hardsetting degradado, variando taxas de aplicação e o conteúdo inicial de água no solo. Os autores comentam que o aumento na estabilidade dos agregados em água, como resultado do tratamento com polímero, promoveu uma redução significativa na resistência tênsil. Este efeito foi mais marcante nas menores concentrações de polímero aplicadas.

Wallace e Wallace (1996) concluíram que é necessário o uso combinado de PAM com produtos a base de cálcio para controle da erosão e melhoria da taxa de infiltração. A eficiência do PAM depende de vários fatores, tais como taxa de infiltração e modo de aplicação do PAM. Solos degradados devido à extração de minérios, na Austrália, também têm sido utilizados em experimentos com uso de PAM. No entanto, os resultados obtidos em laboratório não foram

extrapolados a nível de campo com o mesmo resultado positivo. Acredita-se que o sucesso do uso do PAM em escala de campo requer uma combinação da aplicação do PAM com fontes de cálcio para combater o alto conteúdo de sódio desses solos (VACHER, 1999; RAINE; ALLEN, 1998).

2.2 Material e Métodos

Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”-ESALQ-USP, exceto o de aplicação de polímeros em solos coesos da Austrália, que foi conduzido no Laboratório de Física do Solo da University of Southern Queensland, em Toowoomba.

2.2.1 Resistência tênsil do solo

2.2.1.1 Solos: localização, amostragem e separação dos agregados

Para a validação do equipamento, aqui proposto para determinação da resistência tênsil de agregados, foram utilizadas amostras do horizonte diagnóstico de um ARGISSOLO ACINZENTADO coeso (97-127 cm), localizado em Pacajus - CE (Figura 5).

Figura 5 - Localização do município de Pacajus no estado do Ceará da região nordeste do Brasil

As amostras foram coletadas em forma de blocos indeformados, obtidos com auxílio de caixas de ferro galvanizado, 70 x 150 x 220 mm (Figura 6a). No laboratório, os blocos foram colocados em bandejas forradas com espuma (2 cm de espessura) e umedecidos, por capilaridade,

até próximo da capacidade de campo (Figura 6b). A partir daí, as amostras foram cuidadosamente subdivididas manualmente em agregados (Figura 6c), até que passassem em peneira com malha de 25,4 mm e fossem retidos na de 19,0 mm (Figura 6d).

Figura 6 - Detalhes do processo de coleta das amostras (a), saturação dos blocos (b), separação manual dos agregados (c) e tamanho médio dos agregados (d)

Os agregados foram secos em estufa (com circulação de ar forçada, que homogeniza a temperatura no seu interior) a 40 °C por 48 h, deixados à temperatura ambiente (23 °C) para atingir o equilíbrio ($\cong$ 4 h) e posteriormente medidos quanto à sua resistência tênsil.

2.2.1.2 Determinação da resistência tênsil de agregados de solo

O equipamento avaliado foi um dinamômetro importado pela IMPAC, marca Lutron, modelo FG-20 KG (Figura 7) comparado, com relação à exatidão e precisão, ao instrumento atualmente em uso no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Ciência de Solo da ESALQ-USP (Figura 8), descrito em Imhoff, Silva e Dexter (2002), doravante referenciados como dinamômetros IMPAC e KALATEC, respectivamente.

O dinamômetro IMPAC é um equipamento eletrônico digital, com célula de carga (20 kgf) incorporada em sua carcaça, podendo ser utilizado em ensaios de compressão ou tração. O deslocamento do conjunto móvel (dinamômetro-placa de ruptura) é acionado manualmente por meio de uma manivela, a uma velocidade aproximada de $1,84 \text{ mm s}^{-1}$. Possui uma função “tara” que pode zerar até 100 % da capacidade (20 kg), permitindo o uso em ensaios com pré-carga. No modo “peak hold”, registra a maior força aplicada na ruptura do material. Possui uma interface serial com protocolo de comunicação RS232, o que possibilita a comunicação com computadores e o uso com programas de monitoramento e análise de ensaios (opcional).

Figura 7 - Dinamômetro da IMPAC. Detalhes da fratura do agregado

Figura 8 - KALATEC conforme descrito em Imhoff, Silva e Dexter (2002). Detalhes: a) sistema de aquisição de dados; b) dinamômetro; c) da célula de carga e placa de ruptura

No caso do KALATEC, um êmbolo é acoplado (na sua extremidade inferior) a uma célula de carga (20 kg) e esta a uma placa que faz a compressão no agregado, mantido sobre outra placa fixa à base do equipamento, paralela a primeira citada (Figura 8c). O êmbolo, na sua extremidade superior, é conectado a um atuador eletrônico linear (Figura 8b) e a um microcomputador, que registra o valor da força aplicada para ruptura tênsil de cada agregado (Figura 8a). O conjunto êmbolo-célula de carga-placa superior é movido de cima para baixo, com velocidade constante a uma taxa de $0,03 \text{ mm s}^{-1}$ (TORMENA; FIDALSKI; ROSSI JUNIOR, 2008).

Foram separados 200 agregados de solos coesos, secos a 40°C (24 h) e equilibrados novamente à temperatura ambiente (23°C , por $\cong 4$ h). Cada agregado, de um conjunto de 100, foi submetido ao ensaio de tensão indireta, nos equipamentos avaliados. Cada um deles foi colocado

na sua posição mais estável, dentro de uma cápsula de aço inoxidável (11 mm de altura e 35 mm diâmetro), entre as duas placas metálicas. Para melhor visualização do momento exato da ruptura, colocou-se um espelho atrás do agregado, conforme sugere Young e Mullins (1991a). Anotou-se o tempo total gasto para cada equipamento romper cada um dos 100 agregados. Após a ruptura, cada agregado foi transferido imediatamente para béquer (50 mL) previamente tarado, pesando-se o conjunto béquer-agregado seco ao ar. Este foi levado ao forno de microondas (30 min) para secagem e posterior obtenção da umidade residual.

A opção do uso desse equipamento (forno de microondas) em vez do método convencional da estufa foi fundamentada em ensaios prévios comparativos entre as umidades dos solos obtidas pelo uso dos dois equipamentos. Para isso, pesaram-se em béquer de vidro (50 mL) aproximadamente 10 g de terra fina seca ao ar - TFSA dos mesmos solos, submetendo-se a secagem em forno de microondas, à potência de 1000 W, por períodos de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 min e verificou-se coerência nos resultados de umidade obtidos no tempo de 30 min quando comparados com os da estufa (105 °C, 24 h).

A resistência tênsil dos agregados (Y_{max}) foi determinada segundo procedimentos descritos em Imhoff, Silva e Dexter (2002), calculada conforme Dexter e Kroesbergen (1985), a partir do diâmetro efetivo do agregado, proposto por Watts e Dexter (1998), por meio das eqs. (2) e (3), seção 2.1.1.1.

2.2.2 Densidade do solo

2.2.2.1 Solos: localização, amostragem e separação dos agregados

Foram selecionados sete solos, sob diferentes históricos de cultivo e variabilidade em sua estabilidade estrutural. Dois destes são de amostras do horizonte diagnóstico do ARGISSOLO ACINZENTADO coeso, anteriormente descrito em 2.2.1.1, e de um ARGISSOLO AMARELO não-coeso (130-172 cm), sob mata contígua ao primeiro, ambos localizados em Pacajus - CE (Figura 5). A escolha do solo com caráter coeso foi baseada na propriedade inerente a estes de se esboroar em meio aquoso, sendo muito importante na avaliação da impermeabilidade do revestimento proposto. Os cinco solos restantes são cultivados, oriundos de uma área pertencente à Fazenda Santa Rita, Piracicaba - SP, na região sudeste do Brasil (Figura 9).

Figura 9 - Localização do município de Piracicaba - SP da região sudeste do Brasil

Neste caso, foram coletadas amostras do horizonte superficial (0-30 cm). Destes solos, dois foram classificados como ARGISSOLO VERMELHO (A1 e A2), outros dois como LATOSSOLO VERMELHO (L1 e L2) e um como CAMBISSOLO HÁPLICO (C). Detalhes da amostragem e separação dos agregados foram descrito na seção 2.2.1.1 (Figura 6). Algumas características físicas e químicas dos solos selecionados são mostradas na Tabela 1.

A faixa de tamanho dos agregados utilizada, de 19,0 a 25,4 cm, foi selecionada por ser referência nos estudos que utilizam a metodologia sugerida em Brasher et al. (1966) para a determinação da densidade do solo (ALLBROOK, 1992). Estes agregados foram colocados em bandejas de alumínio, levados à estufa com circulação de ar forçada à temperatura de 40 °C por 48 h e, posteriormente, deixados à temperatura ambiente ($\cong 23$ °C) até atingir o equilíbrio ($\cong 4$ h).

Tabela 1 - Algumas características físicas e químicas dos solos estudados

Solo	Horizonte	$\rho_p^{(a)}$	Análise Granulométrica			C.O. ^(b)
			Areia	Silte	Argila	
		– g cm ⁻³ –	%			
Argissolo Coeso	Bt	2,60	67	4	29	0,07
Argissolo Não Coeso	Bt	2,60	70	2	28	0,16
Argissolo Vermelho (A1)	Ap	2,53	30	27	43	0,71
Argissolo Vermelho (A2)	Ap	2,45	29	38	33	0,66
Cambissolo Háplico (C)	Ap	2,52	44	15	41	1,02
Latossolo Vermelho (L1)	Ap	2,52	43	22	35	0,72
Latossolo Vermelho (L2)	Ap	2,67	35	19	46	0,85

^(a) Densidade de partículas; ^(b) Carbono orgânico

2.2.2.2 Número de imersões do agregado no verniz e seu tempo de secagem

Comercialmente há disponível um produto denominado Lazzudur 7502, que é um verniz automotivo fabricado pela Sherwin-Williams-Ohio. Este produto, à base de poliéster, contém na sua composição química resinas acrílicas, solventes e aditivos. É líquido à temperatura ambiente e não requer diluições ou catalisadores para a sua aplicação, com secagem rápida (20 min para manuseio), conforme dados do fabricante (LAZZURIL, 2006).

Por se tratar de um produto novo para revestimento de agregados de solos, foram realizados ensaios preliminares para comprovar a viabilidade de seu uso, avaliando: a) o efeito da imersão na estabilidade dos agregados de solo; b) o número de imersões necessárias para o revestimento selar o agregado de solo e c) o tempo ideal para secagem.

Para avaliar o efeito da imersão na estabilidade dos agregados, foram selecionados aleatoriamente dez agregados do ARGISSOLO ACINZENTADO coeso. Estes foram amarrados com fio dental e imersos individualmente no verniz por 10 s aproximadamente. Os materiais mais tradicionalmente usados para enlaçar agregados, como fio de cobre, barbantes, linha de costura, podem alterar facilmente as características naturais dos agregados de solo durante análises de sua densidade. Deste modo, a escolha do fio dental foi baseada em sua elasticidade, amoldando-se melhor às formas irregulares dos agregados, diminuindo o risco de compactação ou quebra no processo. A massa do fio dental foi obtida separadamente e usada para calcular as massas do agregado seco ao ar (eq. 9) e do revestimento (eq. 12). Em seguida, o agregado foi suspenso e, com o auxílio de uma lupa (2x), foi observado se haviam indícios de esboroamento, como presença de partículas de solo no recipiente contendo o verniz.

Um outro conjunto de agregados do mesmo solo foi utilizado nos ensaios para determinar o número de imersões e o tempo de secagem. Cada conjunto de dez agregados foi imerso uma, duas ou três vezes no verniz, com tempo de secagem ao ar de 10, 20 ou 30 min. O tempo de imersão para cada agregado foi de aproximadamente 2 s e o intervalo entre imersões 30 s.

Para efeito comparativo entre as metodologias, outros dez agregados coesos foram selecionados e revestidos com resina saran F-310 (Dow Chemical Company, Midland-MI), seguindo o método proposto por Grossman e Reinsch (2002). Os agregados foram inicialmente imersos numa solução de resina diluída em acetona na proporção de 1:4 (saran: acetona), à base de massa. Após 7 min de secagem ao ar, os agregados foram imersos em uma outra solução de

resina, contendo a proporção 1:7 (saran: acetona), deixando-os secar ao ar por 12 min. Em seguida, foram novamente imersos na solução da resina saran (1:7), com tempo de secagem de, no mínimo, 55 min, ou quando não for mais percebido o odor característico da liberação de vapores de acetona-resina. Todo este processo de revestimento (75 min), até completa secagem da resina no agregado, variou de 90 a 120 min.

2.2.2.3 Cálculo da densidade dos agregados

Posteriormente ao tempo de secagem para cada revestimento, os agregados foram pesados e seus volumes determinados pelo princípio de Arquimedes, com base nos procedimentos sugeridos em Flint e Flint (2002), com algumas modificações, comentadas a seguir. Usou-se uma balança analítica, com resolução de 1 mg, com câmara protetora para pesagem, com janelas corredeiras, moldadas em vidro, que diminui interferências externas e melhora a exatidão das medidas de massa. A balança foi zerada com um béquer contendo água, com capacidade volumétrica o suficiente para conter o volume do agregado a ser deslocado. Ao lado da balança colocou-se um suporte metálico, com uma garra adaptada para suspender os agregados, mantendo-os na altura desejada. Ajustou-se a altura da garra de modo que o agregado quando suspenso pelo fio dental pudesse ser imerso completamente na água, sem tocar nas paredes do béquer. Os agregados foram imersos individualmente na água e a massa (g) registrada foi considerada numericamente igual ao volume do agregado + revestimento (cm^3), assumindo-se que a densidade da água é 1 g cm^{-3} (Figura 10).

Figura 10 - Detalhes dos procedimentos para determinação do volume dos agregados pelo princípio de Arquimedes. Adaptada de Cresswell e Hamilton (2002)

O volume total do agregado ($V_{\text{agreg.}}$) foi calculado subtraindo-se do volume do agregado revestido, determinado pelo deslocamento de água, o volume do revestimento (eq. 7).

$$V_{\text{agreg.}} = [(\text{volume do agregado} + \text{revestimento}) - (\text{volume do revestimento})] \quad (7)$$

O cálculo do volume do revestimento ($V_{\text{rev.}}$), eq. (8), é obtido pela razão entre a massa do revestimento ($m_{\text{rev.}}$), obtida da eq. (9), e a densidade do revestimento ($\rho_{\text{rev.}}$), isto é:

$$V_{\text{rev.}} = \frac{m_{\text{rev.}}}{\rho_{\text{rev.}}} \quad (8)$$

$$m_{\text{rev.}} = [(\text{massa do agregado revestido} + \text{fio dental}) - (\text{massa do agregado} + \text{fio dental})] \quad (9)$$

Para determinar a densidade do verniz foram confeccionadas três “esferas” desse material, com diâmetro médio de 22,2 mm (similar aos agregados de solos). Para isso, uma alíquota do verniz foi colocada em uma cápsula de porcelana e levada à estufa (105 °C, 24 h), adquirindo uma aparência gelatinosa e facilmente moldável à forma desejada, sendo sólida à temperatura ambiente ($\cong 23$ °C). Depois de solidificadas, cada esfera foi pesada e seu volume determinado pelo mesmo procedimento utilizado para os agregados. A densidade média do verniz ($\bar{\rho}_v$) foi calculada pela eq. (10).

$$\bar{\rho}_v = \left(\frac{m_{\text{rev.1}} + m_{\text{rev.2}} + m_{\text{rev.3}}}{V_{\text{rev.1}} + V_{\text{rev.2}} + V_{\text{rev.3}}} \right) \quad (10)$$

O valor da densidade média do verniz foi 1,117 ($\pm 0,001$) g cm⁻³. No caso da resina saran, assumiu-se o valor 1,3 g cm⁻³ (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

De cada agregado, após determinado seu volume, foi removido seu revestimento e transferida uma subamostra para béquer de vidro (50 mL), para se obter o conteúdo de água no solo à base de massa. O conjunto béquer-subamostra foi colocado em um forno de microondas, por um período de 30 min. Embora a secagem das amostras tenha sido efetuada em forno de microondas, a expressão “seco em estufa” foi mantida para expressar a massa do solo isenta de água. As amostras foram equilibradas em dessecador por 15 min e, em seguida, pesadas.

O conteúdo de água no solo à base de massa (LIBARDI, 2005), expresso em g g⁻¹, foi calculado por meio da eq. (11).

$$U = \frac{[(\text{massa do bquer} + \text{subamostra mida}) - (\text{massa do bquer} + \text{subamostra seca})]}{[(\text{massa do bquer} + \text{subamostra seca}) - (\text{massa do bquer})]} = \frac{m_a}{m_s} \quad (11)$$

sendo: m_a a massa de gua da subamostra; m_s a massa de slidos da subamostra. A eq. (11) foi utilizada para converter a massa do agregado seco ao ar (m) em massa do agregado seco em estufa (m_s), conforme eq. (12), expressa em g.

$$m_s = \left[\frac{(\text{massa do agregado seco ao ar} + \text{fio dental}) - (\text{massa do fio dental})}{(U + 1)} \right] = \frac{m}{(U + 1)} \quad (12)$$

Determinada a massa do agregado seco em estufa (m_s) e o seu volume total (V), a densidade dos agregados dos solos ($\rho_{\text{agreg.}}$), expressa em g cm^{-3} , foi calculada por:

$$\rho_{\text{agreg.}} = \frac{m_s}{V} \quad (13)$$

2.2.2.4 Densidade dos agregados: comparao entre os revestimentos verniz e resina saran

Aps a metodologia para o uso do verniz no revestimento de agregados de solos ter sido definida (seo 2.2.2.2), a sua validao foi feita incluindo mais cinco solos, comparando-se os resultados gerados pelo verniz e aqueles obtidos usando-se resina saran como revestimento.

Agregados foram selecionados ao acaso, sendo 40 para o ARGISSOLO ACINZENTADO coeso, 40 para o ARGISSOLO AMARELO no-coeso e 20 agregados para cada um dos outros cinco solos. Os agregados foram amarrados com fio dental, pesados (com aproximao de 0,001g). Metade de cada conjunto de agregados foi revestida com verniz, apenas com uma imerso, por 2 s, secando-se ao ar por 30 min. A outra metade foi revestida com resina saran, conforme metodologia proposta em Grossman e Reinsch (2002). Aps tempo de secagem para cada revestimento, pesaram-se os agregados revestidos, determinaram-se os seus volumes, calculando-se as suas densidades, conforme procedimentos descritos nas sees 2.2.2.2 e 2.2.2.3.

A razo entre os volumes do agregado revestido e de seu revestimento (eq. 14), aqui denominada relao volumtrica (RV), sugerida por Silva et al. (2003), foi utilizada para avaliar a quantidade de cada produto (verniz ou resina saran) no revestimento dos agregados.

$$RV = \frac{\text{volume do agregado revestido}}{\text{volume do revestimento}} \quad (14)$$

2.2.3 Análise granulométrica do solo

Foram testados cinco métodos: i) hidrômetro (com uma leitura); ii) hidrômetro (com quatro leituras); iii) pipeta, todos segundo Gee; Or (2002); iv) micro-pipeta (MILLER; MILLER, 1987); v) “método rápido”, sugerido por Kettler, Doran e Gilbert (2001).

Foram utilizadas 20 amostras de TFSA dos horizontes A e/ou B provenientes de 16 perfis de solos, classificados de acordo com EMBRAPA (2006). Estes são solos representativos dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Tabela 2), discutidos no Guia da VI Reunião de Classificação, Correlação e Aplicação de Levantamentos de Solo - RCC (REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO E APLICAÇÃO DE LEVANTAMENTOS DE SOLOS, 2000).

Tabela 2 - Classificação e distribuição geográfica dos perfis modais dos solos utilizados no estudo das análises granulométrica e de retenção de água

Perfil	Horizonte	Classificação	Localização
3	Ap e Bt	Argissolo Bruno-Acinzentado Eutrófico úmbrico	Canguçu - RS
4	Ap e Bt	Argissolo Amarelo Distrófico típico	Pinheiro Machado-RS
5	Bt	Chernossolo Ebânico Órtico vertissólico	Bagé - RS
6	Ap	Planossolo Háptico Eutrófico solódico	Bagé - RS
7	Bt	Luvissole Crômico Órtico típico	Bagé - RS
8	Bt 2	Luvissole Háptico Órtico típico	Bagé - RS
10	Ap e Bt 1	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico espessarênico abrupto	Santa Maria - RS
11	Ap e Bt	Luvissole Háptico Pálico típico	São Sepé - RS
12	Ap	Latossolo Vermelho Distrófico típico	Tupanciretã - RS
13	Bw 1	Latossolo Vermelho Distroférico típico	Ibirubá - RS
14	Bw 1	Latossolo Vermelho-Amarelo Distroférico húmico	Muitos Capões - RS
15	Bw 1	Latossolo Bruno Distroférico húmico	Vacaria - RS
17	Bt 1	Nitossolo Bruno Distrófico típico	Lages - SC
18	Bt 1	Nitossolo Bruno Distrófico típico	Lebon Régis - SC
19	Bw 1	Latossolo Vermelho Distrófico húmico	Canoinhas - SC
20	Bt 2	Nitossolo Vermelho Alumínico típico	Otacílio Costa - SC

Na análise dos resultados também fez parte da discussão, além dos cinco métodos citados anteriormente, os dados obtidos a partir do método do densímetro (INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS - IAC, 1986), realizado pela Embrapa Solos - Rio de Janeiro

nos perfis publicados em Reunião de Classificação... (2000). Algumas características físicas e químicas desses solos são mostradas na Tabela 3, na qual os perfis modais da Reunião de Classificação... (2000) receberam outro número de protocolo: amostras de 1 a 20, e, de agora em diante, assim referenciados.

Tabela 3 - Características físicas e químicas das amostras dos perfis modais dos solos estudados para as análises granulométrica e de retenção de água

Perfil / Horizonte	Amostra	Análise Granulométrica			Matéria Orgânica	Classe Textural*
		Areia	Silte	Argila		
————— % —————						
P03 Ap	1	47	28	25	2,84	Franco
P03 Bt	2	38	20	42	1,21	Franco Argiloso
P04 Ap	3	66	22	12	2,33	Franco Arenoso
P04 Bt	4	38	18	44	1,19	Argila
P05 Bt	5	38	26	36	1,02	Franco Argiloso
P06 Ap	6	59	31	10	1,78	Franco Arenoso
P07 Bt	7	26	23	51	1,97	Argila
P08 Bt 2	8	31	40	29	1,62	Argila
P10 Ap	9	78	16	6	0,95	Areia Franca
P10 Bt 1	10	59	16	25	0,50	Franco Arenoso
P11 Ap	11	51	33	16	1,95	Franco Arenoso
P11 Bt	12	39	24	37	1,48	Argila
P12 Ap	13	70	10	20	1,29	Franco Arenoso
P13 Bw 1	14	8	14	78	1,19	Muito Argiloso
P14 Bw 1	15	4	15	81	0,72	Muito Argiloso
P15 Bw 1	16	4	15	81	1,84	Muito Argiloso
P17 Bt 1	17	19	15	66	1,07	Muito Argiloso
P18 Bt 1	18	14	22	64	1,66	Muito Argiloso
P19 Bw 1	19	27	13	60	1,67	Muito Argiloso
P20 Bt 2	20	12	19	69	0,93	Muito Argiloso

*Segundo Santos et al. (2005)

Dentre os seis métodos estudados, o da micro-pipeta, conforme Miller e Miller (1987), e o método rápido, sugerido por Kettler, Doran e Gilbert (2001), não constam em manuais de análise de solos; por este motivo, serão descritos com mais detalhes a seguir.

No método da micro-pipeta, pesa-se 4 g de TFSA em um tubo cilíndrico de plástico com capacidade para 50 mL (Figura 11a), adiciona-se, via bureta (Figura 11b), 40 mL de solução dispersante (4 g L^{-1} de NaOH + 10 g L^{-1} de hexametáfosfato de sódio). Agita-se por 16 h em mesa agitadora de movimento alternativo horizontal, a 120 oscilações por minuto (Figura 11c).

Figura 11 - Detalhes dos procedimentos do método da micro-pipeta: a) pesagem; b) adição do dispersante; c) agitação e dispersão; d) calibração micropipeta, e) pipetagem da argila

Concluída a agitação, os tubos cilíndricos foram deixados em repouso por duas horas, acondicionados em banho-maria, para que a suspensão do solo atingisse o equilíbrio com a temperatura ambiente ($\cong 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Em seguida, completou-se o volume para 50 mL com água destilada e agitou-se com um bastão de vidro, para promover homogeneização da suspensão do solo. No exato momento após a agitação, iniciou-se a contagem do tempo para sedimentação das partículas. O cálculo deste tempo, para que partículas maiores que $2 \text{ }\mu\text{m}$ sedimentem a uma profundidade de 2,5 cm, foi obtido, conforme a lei de Stokes, pelo uso da eq. 4, seção 2.1.1.3.

Com auxílio de uma pipeta automática, coletou-se uma alíquota de 2,5 mL da suspensão, à 2,5 cm de profundidade (Figura 11d, 11e) e transferiu-se o conteúdo para um béquer de 100 mL. Em seguida, o conjunto béquer-suspensão foi levado à estufa ($105 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 24 h) para obter-se a massa da argila + dispersante. Preparou-se uma prova em branco, que consistiu dos mesmos procedimentos adotados para amostra de solo, excetuando-se a adição desta. O conteúdo da fração argila na amostra é calculado pela eq. (15).

$$\% \text{Argila} = \frac{V_t}{V_p} \cdot \frac{(M_a - M_b)}{M_{\text{TFSE}}} \cdot 100 \quad (15)$$

em que: V_t é o volume total (50 mL); V_p o volume pipetado (2,5 mL); M_a , a massa seca (105 °C) de argila em 2,5 mL da suspensão (g); M_b , a massa seca (105 °C) da prova em branco em 2,5 mL desta solução (g); e M_{TFSE} , a massa (g) de terra fina seca em estufa (105 °C).

Após coleta da alíquota para determinação da fração argila, a de areia (eq. 16) foi determinada por peneiramento em malha com 53 μm de abertura, sendo a de silte (eq. 17), calculada pela diferença entre o total de partículas na TFSE e a soma das frações areia e argila.

$$\% \text{Areia} = \left(\frac{\text{massa de areia peneirada (g), seca a } 105^\circ\text{C}}{\text{massa de TFSE (g)}} \right) \cdot 100 \quad (16)$$

$$\% \text{Silte} = 100 - (\% \text{Areia} + \% \text{Argila}) \quad (17)$$

Com relação ao método de Kettler, Doran e Gilbert (2001), de agora em diante referido como método rápido, os autores comentam que a grande vantagem deste método é sua rapidez em separar as frações granulométricas (aproximadamente 2 h). Esse método consiste na combinação das etapas de peneiramento e de sedimentação.

Após a agitação horizontal (2 h, 120 oscilações por min) de 15 g de TFSA em 45 mL do dispersante, acondicionados em recipientes apropriados (Figura 12a), a areia foi separada por tamisação úmida em peneira com malha de 53 μm , coletando-se as frações argila e silte em proveta de 500 mL (Figura 12b), completando-se o seu volume com água destilada. A suspensão foi agitada e, com base na Lei de Stokes, calculou-se o tempo de sedimentação para as partículas de silte, para uma profundidade de 28 cm. A 1 cm acima desta profundidade, a argila foi cuidadosamente succionada (sem arrastar o silte) com auxílio de uma pipeta acoplada (por uma pequena borracha de silicone) a um Kitassato, conectado a uma bomba de vácuo (Figura 12c).

Figura 12 - Detalhes dos procedimentos do método rápido: a) agitação/dispersão; b) separação da fração areia e coleta da argila e silte; c); sucção e descarte da argila

Procedeu-se a “lavagem” do silte, com o objetivo de remover alguma fração de argila que não tenha sido completamente retirada pelo processo de sucção. Na proveta contendo silte, adicionou-se água destilada até o menisco (500 mL), considerando-se novamente o tempo calculado para sua sedimentação na mesma profundidade, procedendo-se o descarte do sobrenadante de modo similar ao procedimento para coleta e descarte da fração argila. Esta operação foi repetida até que o sobrenadante se tornasse claro (teoricamente isento da fração argila). O silte foi transferido para béquer (100 mL) e seco em estufa (105 °C, 24 h) para determinar sua massa na amostra (M_{silte}). A fração areia foi calculada pela eq. (16), enquanto a de silte e a de argila pelas eqs. (18) e (19), respectivamente.

$$\% \text{ Silte} = \frac{M_{\text{silte}}}{M_{\text{TFSE}}} \cdot 100 \quad (18)$$

$$\% \text{ Argila} = 100 - (\% \text{ Areia} + \% \text{ Silte}) \quad (19)$$

Todos os solos utilizados possuem menos de 5 % de matéria orgânica (Tabela 3), e, por este motivo, não houve a necessidade de pré-tratamento para sua remoção (IAC, 1986; EMBRAPA, 1997). Um resumo dos principais procedimentos utilizados para obtenção das frações granulométricas pelos seis métodos estudados é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Descrição dos procedimentos para análise granulométrica pelos seis métodos estudados

Método	TFSA	Dispersão	Volume		Tempo agitação	Técnica usada para a determinação das frações			Referência
			Água ²	Total ³		Areia	Silte	Argila	
	— g —	Solo:HMP ¹	— mL —		— h —				
Pipeta	40	1 : 2,5	250	500	16	peso (total)	cálculo	peso (sub- amostra)	Gee e Or (2002)
Hidrômetro (1 leitura)	40	1 : 2,5	250	500	16	peso (total)	cálculo	estimativa	Gee e Or (2002)
Hidrômetro (4 leituras)	40	1 : 2,5	250	500	16	estimativa	cálculo	estimativa	Gee e Or (2002)
Micro- pipeta	4	1 : 10	≅ 5	50	16	peso (total)	cálculo	peso (sub- amostra)	Miller e Miller (1987)
Rápido	15	1 : 3	≅ 450	60	2	peso (total)	peso (total)	cálculo	Kettler, Doran e Gilbert (2001)
IAC	20	1 : 5	-	500 ⁴	16	peso (total)	cálculo	estimativa	IAC (1984)

¹Solução de HMP (4 g L⁻¹ NaOH + 10 g L⁻¹ Na hexametáfosfato); ²Volume de água adicionado para dispersão;

³Capacidade volumétrica do recipiente usado para dispersão dos solos; ⁴Balão de Stohmann

Para os ajustes entre a fração argila e a umidade do solo correspondente à tensão 1500 kPa, realizou-se a curva de retenção de água no solo. Para isto, foram utilizadas as mesmas 20 amostras provenientes dos 16 perfis de solos representativos dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Tabela 2). Estes solos têm ampla variação textural, com teores de argila entre 6 e 81 % (Tabela 3), importante para a validação do método.

2.2.3.1 Seleção dos métodos e curva de retenção de água no solo

A comparação entre os métodos para escolha daquele que melhor quantifique as frações granulométricas dos solos foi realizada com base em três princípios: a) ajuste por regressão linear entre as frações granulométricas determinadas pelo método da pipeta versus os demais; b) mudanças na classe textural dos solos, pelo uso dessas frações no triângulo textural; c) melhor ajuste entre a fração argila e a umidade do solo retida na tensão 1500 kPa, por meio do uso de funções de pedotransferência. Neste último, é dado um novo foco para a escolha de métodos, diferente daqueles mais tradicionalmente usados, representada pelos dois primeiros citados.

A classificação textural dos solos foi obtida pelo uso do triângulo textural, utilizando-se o programa computacional Texture AutoLookup - TAL, versão 4.2 (TAL, 2008), selecionando-se o sistema de classificação Canadense, no qual as classes de textura são as mesmas empregadas pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, descritas em Santos et al. (2005) (Figura 13).

Figura 13 - Triângulo de classificação textural de solos segundo Santos et al. (2005)

Para o uso das funções de pedotransferência, determinaram-se o teor de argila (métodos supracitados) e a umidade do solo correspondente à tensão 1500 kPa, utilizando-se câmaras de pressão (KLUTE, 1986) e o equipamento WP 4-T.

O manual do fabricante do WP 4-T sugere um método para determinar a curva de retenção da água no solo, conforme texto original (Figura 14).

Figura 14 - Método sugerido pelo manual do WP 4 - T para estimar a curva de retenção da água no solo

Este método, no entanto, apresenta falhas como a generalização do volume de água necessário para criar uma umidade no solo, independentemente da sua textura, o que dificulta a obtenção de resultados satisfatórios. Deste modo, foi desenvolvida uma metodologia para a otimização do WP 4-T, a partir de amostras com estrutura deformada (TFSA), na qual o usuário deste equipamento possa utilizá-lo com precisão aceitável. A utilização da TFSA foi considerada porque, segundo Hillel (1982), somente sob baixas tensões o teor de água depende da estrutura do solo.

A quantidade de água a ser adicionada em cada amostra de TFSA para se criar diferentes valores de umidade, teve como base a umidade de saturação de cada amostra. Inicialmente, as amostras de TFSA foram colocadas em anéis, feitos a partir de tubos rígidos de PVC (13 mm de altura, 50 mm de diâmetro) em uma peneira (malha 53 μm) sobre uma espuma, contida dentro de uma bandeja plástica. Em seguida, adicionou-se água destilada desaerada para saturação das amostras por capilaridade e, posteriormente, determinação da umidade na saturação (Figura 15).

Figura 15 - Detalhe do processo de saturação das amostras para determinação do gradiente de umidade na obtenção da curva de retenção de água no solo

Para obterem-se os diferentes valores de umidade nas amostras, pesou-se 20 g da TFSA em frascos de vidro (100 mL), com tampa plástica, e adicionou-se água a 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 25, 28 e 30 % do valor da umidade de saturação. Com auxílio de uma espátula de aço inoxidável, homogeneizou-se a amostra (Figura 16a), que em seguida foi compactada levemente com um êmbolo metálico (Figura 16b). Na parte superior do frasco colocou-se plástico filme, para vedação junto com a tampa. O conjunto foi colocado em bandejas metálicas dentro de uma caixa térmica com água, a 23 °C por 16 h, para uniformizar a temperatura das amostras (Figura 16c).

Figura 16 - Detalhe do processo de compactação e equilíbrio da temperatura das amostras

Atingido o equilíbrio térmico, homogeneizaram-se mais uma vez as amostras, pesando-se em torno de 2,5 g da amostra em recipiente plástico, específico para o WP4-T (Figura 17a). Com auxílio de uma rolha de borracha nº 7, fizeram-se suaves compressões na amostra (Figura 17b), com o objetivo de deixar a superfície plana, evitando interferências na leitura. Colocou-se o conjunto tampa-amostra no local indicado do WP 4-T (Figura 17c) para obtenção da tensão com que a água estava retida no solo, com leitura em torno de 4 min.

Figura 17 - Detalhes dos procedimentos para a determinação da curva de retenção de água por meio do WP 4-T

A sensibilidade do WP 4-T fornecida no manual do fabricante tem amplitude de 2 bar, e, por este motivo, as leituras abaixo deste limite foram descartadas. Imediatamente após a leitura, transferiu-se a amostra para bquer de 50 mL e pesou-se (precisão 0,001 g). O conjunto bquer-amostra foi colocado em forno de microondas por 30 min, utilizando a potência de 1000 W (Figura 17d). As amostras foram equilibradas em dessecador (15 min), pesando-se em seguida para obtenção da massa do solo seco. Justificativas sobre o uso do forno de microondas para secagem de solos foram discutidas na seção 2.2.1.2.

Os dados de retenção da água no solo, obtidos para cada amostra, foram ajustados à eq. (20) (GENUCHTEN, 1980). Para isto, utilizou-se o software “Retention Curve” - RetC (GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1994) para a determinação dos parâmetros desta equação.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi)^n]^m} \quad (20)$$

sendo: θ é a umidade atual do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_r é a umidade residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_s é a umidade de saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); Ψ é a tensão com que a água está retida no solo (kPa); α (cm^{-1}), n e m são parâmetros empíricos. Para o cálculo do valor de m , foi utilizada a expressão $m = 1 - 1/n$, conforme sugere Genuchten (1980).

O método do WP4-T forneceu uma ampla variação da tensão para os diferentes valores de umidade obtida nas amostras de solo. Para obter a curva de retenção da água nestes solos, foi padronizado o uso daquelas tensões, considerando-se o intervalo entre 500 e 3000 kPa.

2.2.4 Uso de condicionadores químicos em solos coesos

Para avaliar a eficiência e o mecanismo de ação de condicionadores químicos na redução dos efeitos da coesão em horizontes coesos, a partir de medidas da resistência têsil em agregados destes solos, foram testados dois polímeros aniônicos, à base de poliacrilamida (PAM), sendo: no Brasil, o fabricado pela Cytec (poliacrilamida Superfloc A-130); e, na Austrália, o da CW Pacific Pty Ltd (SoilPam[®]), tanto no estado líquido (emulsão óleo-água-poliacrilamida) como no estado sólido (poliacrilamida em pó). Os polímeros usados têm alto peso molecular e não são tóxicos ao ambiente.

2.2.4.1 Solos: localização, pré-tratamento e preparo das amostras

No Brasil, foram utilizados os mesmos agregados coletados do solo coeso de Pacajus - CE (Figura 5), com diâmetro médio de 22,2 mm, obtidos conforme descrito em 2.2.1.1. Os agregados foram secos em estufa com circulação de ar forçada a 40 °C por 48h e, posteriormente, deixados à temperatura ambiente ($\cong 23$ °C) para atingir o equilíbrio ($\cong 4$ h).

A aplicação do PAM nos agregados foi feita por capilaridade, com o uso de bandejas plásticas forradas com espuma de 20 mm de espessura, saturadas com solução aquosa do PAM na concentração 0,01; 0,05 e 0,10 % (na base de massa), deixando-os equilibrar por 24 h (Figura 18a). Os agregados saturados foram colocados em placa de cerâmica porosa para determinar a umidade nas tensões de 0,1; 0,3; 0,5 e 1,0 bar (Figura 18b e 18c), conforme metodologia descrita por Klute (1986). Attingido o equilíbrio da umidade nas amostras para cada tensão aplicada (Figura 18d), determinou-se a resistência tênsil e a curva de retenção da água no solo.

Figura 18 - Detalhes da determinação da curva de retenção de água nos agregados do solo, com e sem polímero

Na Austrália, o projeto inicial referia-se a coleta de amostra indeformada de solos coesos, similar aos ensaios realizados no Brasil. Porém, em função do tempo chuvoso na época da coleta, foram utilizadas amostras com estrutura deformada do horizonte diagnóstico coeso,

anteriormente coletado sob floresta, sem interferência antropogênica, nas proximidades do município de Toowoomba, estado de Queensland, no nordeste da Austrália (Figura 19).

Figura 19 - Localização do município de Toowoomba, pertencente ao estado de Queensland na nordeste da Austrália

Aproximadamente 40 kg do solo foram colocados em bandejas plásticas e secos ao ar, destorroados e passados em peneira com malha de 2 mm. Cinco peneiras com 45 cm de diâmetro e abertura de malha de 4 mm, forradas com papel filtro, foram utilizadas para acondicionamento da TFSA, a qual foi distribuída até a altura de 3 cm, atingindo uma densidade de $1,3 \text{ g cm}^{-3}$, totalizando aproximadamente 6,2 kg de solo por peneira (Figura 20a).

Figura 20 - Pré-tratamento do solo australiano para o experimento com polímero: a) montagem das peneiras; b) aplicação da água residual - CSG

Em cada peneira foi aplicada uma lâmina de 250 mm da água “Coal Seam Gas” - CSG, em um total de 40 L, mantendo-se uma lâmina de 5 cm (Figura 20b), visando potencializar o caráter coeso do solo, aumentando sua sodicidade e simulando a situação em que os solos se encontram após serem irrigados com água CSG. Esta é uma água residuária da extração de carvão, muito utilizada na irrigação dos solos na Austrália, apesar da sua alta condutividade elétrica, com valores médios de $4,47 \text{ dS m}^{-1}$, à 25°C .

O processo de aplicação da água até a sua total drenagem totalizou 7 dias. O solo contido nas peneiras foi transferido para bandejas metálicas, colocadas em estufa com circulação de ar forçada (40°C), até atingir peso constante (5 dias). O solo foi cuidadosamente destorreado, o suficiente para passar em peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Em funis plásticos de Büchner (10,2 cm de diâmetro), contendo papel de filtro, adicionaram-se aproximadamente 245 g daquela amostra de solo ($< 4,75 \text{ mm}$), atingindo-se uma altura de 2,5 cm aproximadamente, mantendo-se a densidade inicial de $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 21).

Figura 21 - Detalhes da montagem dos funis para o experimento com polímeros no solo coeso da Austrália

Os tratamentos foram constituídos de dois tipos de água (chuva e CSG), duas formas de PAM (líquido e sólido), três doses do PAM líquido ($7,5$; 15 e 30 L ha^{-1}), três doses do PAM sólido (3 , 6 e 12 kg ha^{-1}), duas doses de Gesso (5 e $10 \text{ t Ca}^{++} \text{ ha}^{-1}$) aplicados com PAM líquido ($7,5$ e 15 L ha^{-1}) e sem PAM, uma dose do CaCl_2 ($5 \text{ t Ca}^{++} \text{ ha}^{-1}$), aplicados com PAM líquido ($7,5 \text{ L ha}^{-1}$) e sem PAM (Tabela 5).

A forma de aplicação do polímero e do gesso, ambos no estado sólido, foi “à lanço”, espalhando-os em cima da superfície do solo; enquanto que para o polímero e o CaCl_2 , ambos líquido, foi por meio de um “spray”, pulverizando-os na superfície do solo. Como há perdas do

material pulverizado pelo jato do “spray”, devido ao seu raio de ação, a massa do líquido aplicada foi calibrada em balança, para confirmação das doses (Figura 22).

Tabela 5 - Arranjo experimental para os tratamentos com diferentes taxas de polímero, no estado sólido (PS) e líquido (PL), associado com CaSO_4 no estado sólido (G) e CaCl_2 líquido (Cl) aplicados aos solos

Tratamento	Condiç ionadores			
	PAM		Gesso (sólido)	CaCl_2 (líquido)
	Líquido (L ha^{-1})	Sólido (kg ha^{-1})	(t Ca ha^{-1})	(t Ca ha^{-1})
Solo lixiviado com água destilada (D)				
D	-	-	-	-
DPL7,5	7,5	-	-	-
DPL15	15	-	-	-
DPL30	30	-	-	-
DG5	-	-	5	-
DG10	-	-	10	-
DPL7,5G5	7,5	-	5	-
DPL7,5G10	7,5	-	10	-
DPL15G5	15	-	5	-
DPL15G10	15	-	10	-
DPS3	-	3	-	-
DPS6	-	6	-	-
DPS12	-	12	-	-
Solo lixiviado com água CSG (C)				
C	-	-	-	-
CPL7,5	7,5	-	-	-
CPL15	15	-	-	-
CPL30	30	-	-	-
CPL0 Cl5	0	-	-	5
CPL7,5 Cl5	7,5	-	-	5
CPS3	-	3	-	-
CPS6	-	6	-	-
CPS12	-	12	-	-

Figura 22 - Forma de aplicação do polímero líquido no solo coeso da Austrália. Detalhe da maior dosagem (30 L ha^{-1})

Nos tratamentos com PL, após a sua aplicação, o conjunto funil-solo, foi levado à estufa (40 °C, 6 h), para simular sua evaporação e incorporação no campo. Em seguida, o conjunto funil-solo receberam os outros condicionadores (gesso ou CaCl_2) nas diferentes dosagens.

O gesso utilizado foi o comercial para uso agrícola, com 85 % de pureza em cálcio. Para simular a irrigação foi aplicado, em cada funil, em torno de 2 L de água destilada, mantendo uma lâmina de 2 mm. A justificativa do uso desta água, para simular a da chuva, tem como base a semelhança entre suas características físico-químicas, principalmente com relação a condutividade elétrica ($2,26 \mu\text{S cm}^{-1}$, à 25 °C). Após a drenagem completa, desconectou-se, cuidadosamente, a base do funil, levando-se o conjunto base-solo-condicionador para secagem em estufa (24 h, 40 °C). As amostras foram separadas da base do funil, adquirindo o formato de anéis ($\cong 2,5$ cm de altura, $\cong 10$ cm de diâmetro), com umidade adequada para separação dos agregados, conforme descrito na seção 2.2.1.1. A partir de cada anel de solo foi obtido três agregados de diâmetro médio de 22,2 mm, colocados em estufa (48 h, 40 °C) para homogeneização da umidade. Logo após isto, foram colocados em sala com temperatura controlada ($\cong 25$ °C), para que atingissem um novo equilíbrio de temperatura (24 h).

A medida da resistência tênsil, totalizando nove agregados por tratamento, foi realizada por meio de ensaios de tensão indireta, usando o equipamento LoadTrac II, fabricado pela Geocomp Corporation (Figura 23).

Figura 23 - Equipamento utilizado nos ensaios de resistência tênsil dos agregados (a), com detalhe para o momento da sua ruptura

Após o ensaio de ruptura, cada agregado foi pesado e levado a estufa (24 h, 105 °C), para determinação da massa seca. A resistência tênsil foi calculada segundo eq. (2) e (3), conforme descrito anteriormente na seção 2.1.1.1.

2.2.5 Análises estatísticas

Foram analisados os dados de cada experimento individualmente, respeitando-se o delineamento experimental adotado. As análises de variância, comparação de médias, regressão e estatística descritiva dos parâmetros avaliados foram realizadas utilizando-se o software “Statistical Analysis System” (SAS INSTITUTE, 2001). Os dados foram analisados pelos procedimentos PROC MEANS e PROC GLM, e os valores médios comparados entre si pelo teste Tukey ao nível de 5 % de probabilidade e PROC REG para o teste de regressão.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Resistência tênsil de agregados de solos

Os ensaios da determinação de ruptura dos agregados do solo coeso, para avaliar a viabilidade do uso do equipamento IMPAC, mostraram que em apenas 50 min conclui-se a análise de 100 agregados. Entretanto, utilizando o KALATEC para ruptura dos outros 100 agregados, foram necessários 110 min.

No equipamento IMPAC a aplicação da carga ao agregado, para promover sua ruptura, é feita por meio de uma manivela, acionada manualmente. Os ensaios preliminares para determinar a taxa de deslocamento do êmbolo, resultaram em uma velocidade média de $1,84 \text{ mm s}^{-1}$, que é, aproximadamente, 60 vezes maior que a do KALATEC, com valor constante de $0,03 \text{ mm s}^{-1}$ (TORMENA; FIDALSKI; ROSSI JUNIOR, 2008).

Quanto aos resultados da resistência tênsil de agregados determinados por ambos os equipamentos, nas mesmas condições de umidade, aqueles obtidos pelo IMPAC não diferiram quando comparados aos do KALATEC (Tabela 6). Deste modo, apesar da ampla diferença entre

as velocidades de deslocamento do êmbolo dos equipamentos, isto não interferiu nos resultados da resistência tênsil medida.

Tabela 6 - Análise estatística descritiva dos ensaios de resistência tênsil de agregados realizados entre um medidor equipado com dinamômetro da IMPAC e outro com motor de passo

Parâmetros Estatísticos	Resistência Tênsil	
	IMPAC	KALATEC
Média (kPa)	62,18a	62,91a
Variância	276,007	263,215
Desvio Padrão	16,613	16,224
CV (%)	26,72	25,79
Observações	100	100

Médias seguidas por letras iguais indicam diferenças não significativas ($P < 0,05$) pelo teste de Tukey

A rapidez na obtenção dos dados de ruptura dos agregados pelo uso do equipamento IMPAC (50 min) se deve não só pela sua maior velocidade de deslocamento do êmbolo, mas também em relação a todos os procedimentos durante os ensaios. Nestes, o manuseio dos agregados, antes e depois de sua ruptura, em relação ao seu ajuste na posição mais estável antes da aplicação da força, é mais simples. No caso do KALATEC, o êmbolo é deslocado aproximadamente 7 cm (curso total) para a ruptura do agregado. Para isto, antes da aplicação da força sobre o agregado, é necessário abaixar a base (placa inferior), travando-a em seguida. Este procedimento é realizado a cada troca e reposicionamento do próximo agregado (até aproximadamente 20) a ser submetido ao ensaio de ruptura. Todo esse processo, incluindo sua velocidade ($0,03 \text{ mm s}^{-1}$), resultou em um maior tempo para a realização dos ensaios (110 min).

A justificativa do menor tempo gasto para a realização dos ensaios de ruptura de agregado pelo equipamento IMPAC já tem motivado o seu uso em pesquisas, como observado em Neves Junior (2008). Os resultados obtidos (Tabela 6) comprovam que o equipamento IMPAC é viável como instrumento alternativo para a determinação da resistência tênsil de agregados de solos, podendo substituir o KALATEC com exatidão e precisão satisfatórias. Desta forma, a obtenção da resistência tênsil de agregados do solo foi agilizada, o que facilitará a utilização deste parâmetro como indicador da qualidade física do solo.

Com base na validação dos resultados observados anteriormente, os ensaios de ruptura para o solo coeso na determinação de sua resistência tênsil, submetendo seus agregados a tratamentos

com diferentes aplicações de polímero sob diferentes umidades, foram realizados com o equipamento IMPAC, detalhados na seção 2.3.4.

2.3.2 Densidade do solo

2.3.2.1 Efeitos da imersão na estabilidade dos agregados e espessura do revestimento

Solos cujos agregados apresentam baixa estabilidade em água são mais susceptíveis às perdas de partículas durante o processo de imersão dos agregados no material de revestimento (CAMPBELL, 1973). Apesar dessa tendência, a imersão dos agregados do solo coeso no verniz automotivo não afetou sua estabilidade. Uma observação minuciosa via lupa (2x), foi realizada no recipiente contendo o verniz após a imersão dos agregados, comprovando-se que não houve perdas de partículas do solo, ratificando o uso do verniz como revestimento de agregados.

Embora o tempo de imersão no ensaio de estabilidade (10 s) não tenha promovido o esboroamento dos agregados, observou-se que após 5 s de imersão, alguns agregados começaram a liberar bolhas de ar, possivelmente devido à penetração do verniz em seus poros (BURT, 2004). Estes agregados, após secagem ao ar, apresentaram revestimentos mais espessos, 5 % aproximadamente da massa do agregado seco ao ar. Portanto, foi definido o tempo de 2 s para imersão dos agregados no verniz visando obter camadas mais delgadas.

A espessura da película formada pelo revestimento está diretamente associada à exatidão dos resultados do volume do agregado (ABROL; PALTA, 1968; VINCENT; CHADWICK, 1994; CRESSWELL; HAMILTON, 2002; BURT, 2004). De acordo com Grossman e Reinsch (2002), o revestimento com a resina saran deve ser menor que 3 % do peso do agregado, após secagem (tida como concluída quando da ausência do odor característico promovido pela liberação de vapores do solvente empregado, no nosso caso, entre 90 e 120 min). Observou-se que o revestimento das amostras com a resina saran formou uma película com 1,73 ($\pm 0,33$) % do peso dos agregados. Quando as amostras foram revestidas com verniz automotivo (uma imersão e 30 min de secagem), a camada formada foi mais delgada, com 1,09 ($\pm 0,30$) %, proporcionando uma economia de mais de 37 % de material. Dados do fabricante mostram que após 20 min da aplicação do verniz automotivo este forma uma camada seca de espessura entre 25 e 30 μm (LAZZUDUR, 2006).

Essa menor espessura do revestimento com verniz foi também observada quando se usou a relação volumétrica (RV), eq. 12, que mede a razão entre os volumes do agregado revestido e o revestimento (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores de F da análise de variância da relação volumétrica (RV) para o revestimento dos agregados com verniz ou resina saran e a comparação entre revestimentos e entre solos pelo teste de Tukey

Solo	Revestimento*		CV (%)	F	Pr>F
	Verniz	Resina			
Argissolo Acinzentado coeso	54,1 Aa	34,3 Ab	10,1	195,9	
Argissolo Amarelo não-coeso	47,5 Ba	36,2 Ab	12,3	48,2	
Argissolo Vermelho (A 1)	33,1 CDa	25,2BC b	4,7	168,1	
Argissolo Vermelho (A 2)	35,9 Ca	25,4 BCb	6,5	137,6	< 0,0001
Latossolo Vermelho (L 1)	33,3 CDa	26,1 Bb	4,9	125,2	
Cambissolo Háplico (C)	31,4 CDa	25,0 BCb	8,2	37,9	
Latossolo Vermelho (L 2)	29,3 Da	22,7 Cb	7,7	54,5	

*Médias seguidas por letras iguais, minúsculas na linha e maiúsculas nas colunas, não diferem entre si ($P < 0,05$)

Quanto maior o valor da RV menor será a espessura da camada de revestimento (SILVA et al., 2003). Portanto, com base nas diferenças das médias da RV entre os revestimentos usados (Tabela 6), pode-se afirmar que, em todos os solos, a espessura média do revestimento com verniz foi mais delgada que aquela promovida pela resina saran. Não foi observado um padrão destas espessuras para os dois revestimentos avaliados entre os sete solos.

Embora de espessura mais delgada, houve poucos casos de entrada de água nos agregados revestidos com verniz durante o processo de determinação de seus volumes. Este fato pode ser, provavelmente, devido à presença de macroporos nesses agregados (TAN, 1996). Caso semelhante foi observado com a resina saran, apesar de ser considerada um revestimento padrão, havendo falhas na impermeabilização em alguns agregados. Nestes casos, ocorreu o aparecimento de bolhas de ar entre as depressões desses agregados. A correção foi feita adicionando-se algumas gotas da resina nesses locais específicos. Sander e Gerke (2007) também observaram fato semelhante e comentam a respeito da eficácia da resina saran no revestimento de agregados. Além disso, os autores comentam que durante e/ou após imersão em água, alguns agregados resinados mudaram sua coloração, adquirindo uma aparência leitosa. Esta indicação de

entrada de água serviu como critério para descarte daqueles agregados resinados que tinham falhas imperceptíveis de revestimento (sem formação de bolhas).

2.3.2.2 Efeitos do número imersões e do tempo de secagem na densidade dos agregados

O acréscimo do número de imersões no verniz aumentou os valores da densidade dos solos, enquanto que o aumento no tempo de secagem de 10 a 30 minutos, os reduziram (Figura 24).

Figura 24 - Efeito do número de imersões do agregado em verniz automotivo e tempo de secagem na densidade do solo em comparação com o método da resina saran. As barras de erro indicam intervalos de confiança de 95%

O aumento da densidade do solo com o número de imersões sugere infiltração do verniz nos poros do solo, e que esta aumentou com o número de imersões (ou período de imersão total). Blake e Hartge (1986) encontraram fato semelhante para o aumento do número de imersões em resina saran. A penetração da resina nos poros dos solos interfere nas correções da massa e do volume do revestimento, bem como na exatidão da determinação do conteúdo de água do agregado e, conseqüentemente, nos resultados da sua densidade (BURT, 2004; SANDER; GERKE, 2007). A diminuição da densidade dos agregados com o tempo de secagem reflete a redução da umidade e do volume do verniz durante a evaporação de suas substâncias voláteis.

Com relação aos valores da densidade dos agregados, obtidos por uma imersão no verniz e 30 min de secagem, não foram observadas diferenças significativas ($P < 0,05$) entre estes e

aqueles conseguidos com o uso da resina saran (Figura 24). Baseado neste resultado sugere-se que: uma imersão e 30 min de secagem sejam adotados como procedimentos metodológicos satisfatórios para o uso do verniz automotivo no revestimento de agregado de solos.

Apesar do tempo de análise ser um fator menos importante que a reprodutibilidade dos resultados (especialmente sob a perspectiva científica), quando se trata de análises de rotina, este passa a ser significativo, principalmente sob o aspecto prático e econômico (GOOSSENS, 2008). Desse modo, o tempo de secagem do verniz, aliado ao uso do forno de microondas na obtenção da massa do solo seco do agregado, contribuíram na redução do tempo total da análise.

O uso do forno de microondas na determinação da umidade de solo já foi testado por outros autores (GEE; DODSON, 1981; MENDOZA; OROZCO, 1999), os quais concluíram que a grande vantagem desse equipamento sobre o método convencional (estufa) é, principalmente, a redução do tempo para a determinação do conteúdo de água no solo. Pode-se ainda ressaltar a redução de custos das análises com o uso do forno de microondas, já que estes são menos onerosos que as estufas destinadas para secagem de materiais em laboratórios.

2.3.2.3 Densidade de agregados: comparação entre resina saran e verniz automotivo

A análise dos resultados de densidade dos agregados dos sete solos, considerados na validação da metodologia proposta, mostra que não houve diferença ($P < 0,05$) entre os valores obtidos, independentemente do tipo de revestimento utilizado (Tabela 8).

Tabela 8 - Comparação entre a densidade dos agregados revestidos com resina saran ou verniz

Solos	n	Densidade do agregado (g cm^{-3})*	
		Resina saran	Verniz
Argissolo Acinzentado coeso	20	1,78 ($\pm 0,02$)	1,80 ($\pm 0,03$)
Argissolo Amarelo não-coeso	20	1,69 ($\pm 0,05$)	1,71 ($\pm 0,03$)
Argissolo Vermelho (A 1)	10	1,82 ($\pm 0,03$)	1,84 ($\pm 0,06$)
Argissolo Vermelho (A 2)	10	1,85 ($\pm 0,02$)	1,85 ($\pm 0,01$)
Latossolo Vermelho (L 1)	10	1,73 ($\pm 0,03$)	1,72 ($\pm 0,03$)
Cambissolo Háplico (C)	10	1,76 ($\pm 0,07$)	1,74 ($\pm 0,03$)
Latossolo Vermelho (L 2)	10	1,86 ($\pm 0,06$)	1,89 ($\pm 0,05$)

* Não houve diferenças significativas entre as médias na linha ($P < 0,05$) pelo teste de Tukey. Valor entre parênteses indica o desvio padrão

Foi observado que a variação da densidade dos agregados foi similar para cada revestimento, confirmando que o revestimento com verniz é capaz de identificar diferenças significativas entre tratamentos do solo em nível semelhante àqueles com a resina saran. Aliado a isto, sua disponibilidade no mercado e sua rapidez no processo de impermeabilização de agregados tornam o verniz automotivo Lazzudur um produto potencialmente eficaz como revestimento alternativo à resina saran na determinação da densidade de agregados de solos.

2.3.3 Análise Granulométrica

A abordagem da discussão dos resultados foi conduzida em três etapas, sendo que as duas primeiras seguiram a forma mais tradicional de comparação entre métodos. A terceira etapa consistiu de uma nova proposta alternativa para a seleção de métodos.

2.3.3.1 Primeiro modo de seleção: comparação entre as frações granulométricas pela pipeta e demais métodos

Nesta primeira seleção para a escolha do método mais apropriado para análise granulométrica de solos, compararam-se os resultados dos cinco métodos com aqueles obtidos pelo da pipeta, tomando-se como critério o melhor ajuste dentre as regressões lineares determinadas entre eles.

A análise gráfica dos resultados mostra o grau de agrupamentos entre as regressões lineares determinadas (Figura 25). Observa-se que quanto maior o grau de agrupamento mais próximo serão os valores das frações granulométricas em relação ao método da pipeta. Com base nisto, pode-se selecionar dois métodos: rápido e IAC, que mais se equipararam ao padrão (pipeta). Fica fácil perceber que, os outros métodos subestimaram a fração silte (Figura 25), comprovados pelos mais baixos valores dos coeficientes de determinação, R^2 (Tabela 9).

A fração areia apresentou altos valores dos coeficientes de determinação, variando entre 0,959 e 0,999 (Tabela 9). Esta fração foi determinada tanto pelo modo direto: por peneiramento úmido, nos métodos da pipeta, micro-pipeta, hidrômetro 1 leitura e IAC; como pelo indireto, onde é estimada por meio de diferentes tempos de sedimentação, caso específico para o hidrômetro com 4 leituras.

Figura 25 - Ajuste entre as frações granulométricas determinadas pelo método da pipeta e demais métodos para os 20 solos estudados

Tabela 9 - Coeficientes de determinação (R^2) das regressões lineares para as frações granulométricas determinadas nos 20 solos pelo método da pipeta e os demais

Método	Frações Granulométricas		
	Areia	Silte	Argila
	R^2		
Hidrômetro 1 leitura	0,997	0,894	0,997
Hidrômetro 4 leituras	0,993	0,929	0,999
Micro-pipeta	0,997	0,854	0,994
Rápido	0,999	0,944	0,997
IAC	0,959	0,830	0,996

Os resultados mostram que o modo de determinação da fração areia não interferiu na exatidão de sua quantificação. Porém, a forma de obtenção da areia, estimando o seu conteúdo a partir de diferentes tempos de sedimentação, como caso do método do hidrômetro com 4 leituras, tem sido amplamente criticada e não recomendada por alguns autores (GEE; BAUDER, 1979; BOHN; GEBHARDT, 1989; ASHWORTH et al., 2001).

Gee e Bauder (1986) argumentaram que os tempos de sedimentação adotados empiricamente são incompatíveis com as exigências da teoria de sedimentação, recomendando os procedimentos gravimétricos (forma direta), como lavagem e pesagem da areia retida em peneira com abertura de 53 μm , para a obtenção mais exata dessa fração. Diante disto e aliado ao fato da simplicidade dos procedimentos, é recomendado para obtenção da fração areia, principalmente daqueles solos com textura mais grosseira, o método do hidrômetro com apenas uma leitura.

Com relação à fração silte, os mais baixos valores de R^2 (0,830 a 0,894), observados nos métodos do hidrômetro com uma leitura, micro-pipeta e IAC, evidenciam os erros acumulados nessa fração devido a sua forma indireta de determinação, calculado a partir da diferença percentual: $100 - (\text{argila} + \text{areia})$. O maior valor de R^2 (0,944), obtido pelo método rápido, único entre os demais que determina esta fração gravimetricamente, pode confirmar os erros quando da obtenção desta fração por cálculo. O método do hidrômetro com 4 leituras foi o que apresentou valor de R^2 mais próximo do método rápido. Neste caso, o escalonamento das leituras, por diferentes tempos de sedimentação, parece ser mais eficiente para esta fração do que para a de areia, criticada em Gee e Bauder (1986). Deste modo, o método do hidrômetro com 4 leituras pode ser uma alternativa mais simples para a determinação da fração silte, sem as dificuldades

apresentadas pelo método rápido, como o uso de bomba de vácuo, o qual exige habilidade do operador para a não remoção da fração silte durante o processo de sucção da argila (Figura 12c).

Quanto à fração argila, seus altos valores de R^2 sugerem que qualquer um dos métodos estudados pode ser substituto do método da pipeta, considerado como padrão. Porém, alguns autores têm questionado o tempo de sedimentação das frações areia e silte para melhor recuperação da argila utilizando o hidrômetro (MILLER; RADCLIFFE; MILLER, 1988; GEE; BAUDER, 1979). Em geral, há um consenso que a leitura da fração argila seja realizada a um intervalo de tempo mais longo, já que esta fração permanecerá em suspensão após sua dispersão.

Diante do exposto, para essa primeira abordagem sobre escolha de métodos, sugere-se o do hidrômetro, com apenas uma leitura, por ser o mais simples entre aqueles comparados. Este método atualmente é utilizado em análises de rotina no Laboratório de Física de Solos do Departamento de Ciência de Solo da ESALQ-USP.

2.3.3.2 Segundo modo de seleção: comparação entre as frações granulométricas a partir de mudanças na classe textural dos solos

Os resultados das frações granulométricas obtidos pelos seis métodos foram usados para gerar a classificação textural dos solos (Figura 26). Esta foi realizada, manualmente, pelo uso do triângulo de classificação textural de solos, sugerido em Santos et al. (2005) (Figura 13) e por planilhas eletrônicas, utilizando o software TEXTURE AUTOLOOKUP - TAL (2008), selecionando o sistema Canadense, que é similar ao adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Como não foram observadas diferenças de classificação entre os métodos manual e computacional, recomenda-se o uso do software TAL (2008), pela sua maior rapidez na obtenção dos resultados.

Os solos foram agrupados em sete classes texturais (Tabela 10), dentre as treze atualmente adotadas pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, independentemente da escolha do método para determinação da granulometria dos solos.

A maioria dos métodos teve precisão satisfatória em agrupar os solos mais arenosos em classes texturais mais grosseiras, como observado para o solo 9 (areia franca) e os 3, 6, 10, 13 (franco-arenosa). Para aqueles solos com maiores teores de frações mais finas (silte e argila), foram observadas as maiores variações na distribuição das classes texturais dos solos.

Figura 26 - Classes texturais dos 20 solos determinadas pelo triângulo textural segundo Santos et al. (2005), utilizando o software TAL (2008)

Tabela 10 - Distribuição da classe textural dos solos (1 a 20) com base nos valores das frações granulométricas obtidas pelos seis métodos avaliados

ClasseTextural	M é t o d o					
	Pipeta	Hidrômetro 1 leitura	Hidrômetro 4 leituras	Micro-pipeta	Rápido	IAC
Solos						
Areia Franca	9	—	9	9	9	9
Fr-arenosa	3, 6, 10, 13	3, 6, 9, 10	3, 6, 10, 11,13	3, 6, 10, 13	3, 6, 10, 11, 13	3, 6
Franca	1, 11	—	—	11	1	1, 11
Fr-arg-arenosa	5	1, 5, 11, 13	1, 5	1	5	10, 13
Fr-argilosa	2	—	2	5	2, 8	5, 8, 12
Argilosa	4, 7, 8, 12,19	2, 4, 7, 8, 12	4, 7, 8, 12	2, 4, 7, 8, 12	4, 7, 12,17,19	2, 4, 7
M.argilosa	14, 15, 16,17, 18, 20	14, 15,16,17, 18, 19, 20	14, 15,16,17, 18, 19, 20	14, 15,16,17, 18, 19, 20	14, 15, 16, 18, 20	14,15,16, 17, 18, 19, 20

Fr-arenosa = Franco-arenosa; Fr-arg-arenosa = Franco-argilo-arenosa; Fr-argilosa = Franco-argilosa; M. argilosa = Muito argilosa

Nestes casos, as frações mais finas, juntamente com as mais grossas, são distribuídas em proporções aproximadamente iguais, conferindo a estes solos aquelas classes intermediárias, como: franca, franco-argilo-arenosa e franco-argilosa. Nessas classes seus limites, dados pelas frações granulométricas, estão em uma faixa estreita, fazendo com que pequenas variações nos teores dessas frações promovam mudanças abruptas nas classes texturais dos solos, em função da escolha do método para determiná-las.

Com relação aos solos com teores de argila $> 40\%$, os seis métodos tiveram, em geral, a mesma precisão em distingui-los em duas classes: argilosa, agrupando os solos 4, 7, 8, 12 e/ou 19; e muito argilosa, para os solos 14, 15, 16,17, 18, 20 e/ou 19, mesmo havendo variações nas posições desses solos dentro dessas duas classes texturais (Figura 26). Isto se deve ao fato dessas classes estarem situadas entre uma ampla faixa de teores de argila: variando de 40 a 60 %, para a classe argilosa; sendo $> 60\%$, para a muito argilosa. Esses resultados estão de acordo com os encontrados em Goossens (2008). Este autor fez estudo similar comparativo entre dez técnicas para determinação da granulometria de sedimentos, concluindo que não existe um método que possa ser considerado padrão para medir o tamanho da distribuição de grão por meio dos parâmetros utilizados, como no caso, a classificação textural.

De uma maneira geral, foram observadas variações na distribuição das classes texturais, indicando que os solos podem ser classificados diferentemente, em função do método adotado para análise granulométrica. Essas diferenças na classificação textural dos solos pelos seis métodos se devem, provavelmente, aos problemas metodológicos na quantificação mais exata dessas frações finas. Konert e Vandenberg (1997) comentam que os métodos que usam o princípio da sedimentação (pipeta, micro-pipeta, hidrômetro) baseiam-se em pressupostos que, na prática, não são verdadeiros, como por exemplo: a) velocidade de sedimentação é constante e não muito rápida; b) as partículas são esféricas, sólidas e lisas; c) a densidades das partículas são iguais a do quartzo ($2,65 \text{ g cm}^{-3}$); d) não ocorre interações entre as partículas ou entre elas e a parede do recipiente de sedimentação.

Estes resultados sugerem que o modo empregado nesta segunda abordagem não foi eficiente para escolha de métodos para análise granulométrica.

2.3.3.3 Terceiro modo de seleção: comparação entre as frações granulométricas a partir de funções de pedotransferência (FPT)

Os teores de argila determinados pelos seis métodos estimaram, com elevada precisão ($R^2 > 0,9$), a umidade do solo retida na tensão de 1500 kPa por meio das FPT (Figuras 27 e 28).

Figura 27 - Análise de regressão linear entre os teores de argila e a umidade do solo retida na tensão de 1500 kPa, estimada pelo RetC, a partir da curva de retenção de água no solo pelo WP 4-T

Figura 28 - Análise de regressão linear entre os teores de argila e a umidade gravimétrica do solo retida na tensão de 1500 kPa determinada em câmaras de pressão segundo Klute (1986)

A comparação entre valores do coeficiente de determinação (R^2) para a umidade do solo retida na tensão de 1500 kPa ($\theta_{1500 \text{ kPa}}$), tanto estimada pelo RetC (com os dados do WP4-T) como determinada em câmaras de pressão, segundo procedimentos sugeridos em Klute (1986), sugerem resultados satisfatórios para o uso das FPT e que estas podem ser construídas a partir de qualquer um dos métodos usados (Tabela 11).

Embora as FPT obtidas a partir dos dados da $\theta_{1500 \text{ kPa}}$, conforme Klute (1986), apresentarem R^2 maiores que aqueles gerados pelo RetC-WP 4-T, este último método foi mais rápido na obtenção da curva de retenção de água no solo (CRAS). O método de Klute (1986) demandou entre 7 (para os solos arenosos) e 25 dias (para os mais argilosos) para equilibrar a tensão da água à 1500 kPa, enquanto que com o uso do WP 4-T este tempo foi reduzido para 24 h (tempo total do preparo da amostra até a obtenção dos dados da CRAS: tensão e umidade), independentemente da textura do solo.

A escolha do melhor método para determinação da granulometria dos solos, baseada no melhor ajuste entre as FPT, indicaria o método da micro-pipeta, que apresentou os mais altos valores de R^2 , sendo o do IAC aquele com menor valor entre eles (Tabela 11).

Tabela 11 - Teores de argila determinados pelos métodos estudados e R^2 entre os teores de argila e $\theta_{1500\text{kPa}}$, estimada (RetC-WP 4-T) e determinada (KLUTE, 1986)

Solo	$\theta_{1500\text{ kPa}}$		Pipeta	H 1 ^(a)	Método			IAC
	WP4-T	Klute (1986)			H 4 ^(b)	MP ^(c)	Rápido	
	%				% Argila			
1	7,8	9,4	21,3	24,3	23,1	25,0	17,0	24,6
2	12,5	13,9	37,2	42,5	39,3	40,9	35,6	41,6
3	4,3	5,7	13,6	16,4	13,4	16,1	11,2	12,2
4	14,5	15,9	44,3	48,5	47,2	48,9	42,2	43,6
5	10,7	11,6	28,1	29,7	28,5	30,9	23,9	35,5
6	3,3	3,6	9,4	12,6	8,5	9,6	8,8	10,1
7	18,1	19,2	48,0	54,0	50,3	53,9	45,1	51,1
8	17,7	18,4	41,2	46,7	44,6	50,7	39,3	29,4
9	2,0	2,8	6,7	11,3	6,8	6,6	5,9	6,0
10	4,5	4,9	12,5	16,4	13,4	13,2	11,4	24,5
11	6,6	7,6	16,7	20,4	18,4	19,5	14,5	16,3
12	18,0	18,0	44,8	49,8	46,4	55,2	42,1	37,3
13	6,9	6,3	17,5	22,0	17,9	18,9	16,0	20,2
14	28,8	27,2	76,1	83,9	81,3	81,7	73,3	78,3
15	29,6	30,3	80,9	88,5	86,6	87,6	77,6	80,6
16	26,5	30,8	80,5	87,2	85,2	85,8	75,7	81,0
17	24,4	24,6	63,5	69,9	67,4	68,4	58,1	66,1
18	23,8	24,9	68,5	74,8	72,9	73,8	63,5	64,0
19	19,6	19,9	57,9	64,5	60,5	64,0	54,2	60,0
20	26,8	27,8	66,7	71,6	69,6	75,3	61,8	68,7
RetC-WP4-T	R^2 (d)		0,979	0,976	0,978	0,989	0,975	0,924
Klute (1986)			0,984	0,979	0,983	0,990	0,978	0,931

^(a) Método do hidrômetro com 1 leitura; ^(b) Método do hidrômetro com 4 leituras; ^(c) Método da micro-pipeta.

^(d) A análise de variância da regressão apresentou R^2 significativo ao nível de 5% de probabilidade para todos os métodos

Porém, como todos os métodos apresentaram altas correlações positivas entre os seus teores de argila e a $\theta_{1500\text{kPa}}$, a escolha do método do hidrômetro com apenas uma leitura surge como alternativa mais viável, devido a sua simplicidade, baixo custo e rapidez nos procedimentos de análises de rotina.

2.3.4 Uso de condicionadores químicos em solos coesos

O aumento das dosagens de PAM não refletiu em reduções da resistência tênsil dos agregados dos solos coesos de Pacajus-CE, nem em acréscimos nas suas umidades, exceto na tensão de 0,10 bar. Nesta, observa-se uma tendência de aumento de umidade entre a testemunha (0,00 % de PAM) e as amostras com taxa de aplicação de 0,05 % (Figura 29).

Figura 29 - Valores de resistência tênsil e umidade dos agregados em função das doses de polímero aplicada

Chan e Sivapragasam (1996) estudando o efeito das taxas de aplicação de PAM (0,001 a 0,010 %) na redução da resistência tênsil de agregados de solos coesos, comentam que os resultados foram mais pronunciados para as concentrações mais baixas (0,001 %), dez vezes mais diluídas que a menor taxa usada nesta pesquisa. A forte relação entre a resistência tênsil dos agregados dos solos (RT) e o conteúdo de umidade tem sido comentada por alguns autores (HORN; DEXTER, 1989; BLANCO-CANQUI; LAL, 2006). Segundo esses, a RT decresce com o aumento do conteúdo de água por causa do conseqüente enfraquecimento das ligações das partículas minerais e estas com as orgânicas nos agregados devido à umidade.

A aparente discrepância entre os resultados desta pesquisa e aqueles relatados pelos autores anteriormente citados pode ser explicada pelas concentrações das soluções do PAM e seus mecanismos de adsorção à superfície dos agregados dos solos. Malik and Letey (1991),

estudando o efeito do tamanho de partículas do solo na adsorção de PAM, comentaram que a viscosidade da solução do polímero interfere na sua penetração em agregados dos solos.

Os ensaios qualitativos para avaliar a faixa de concentração do PAM e seus efeitos na estabilidade de agregados coesos foram decisivos na seleção das dosagens do PAM para redução do caráter coesos dos solos. Nesses ensaios, os agregados, após receberem aplicação da solução de PAM (0,01 a 0,10 %) por capilaridade, não apresentaram mais o comportamento de esboroamento ao serem mergulhados em água. A partir deste resultado definiram-se as concentrações para o experimento, avaliando essas concentrações na redução da RT. Segundo Young e Mullins (1991b) e Chan (1995), o esboroamento de solos coesos está relacionado à quantidade de material fino ($<0,05\text{mm}$), liberado durante a imersão dos agregados na água, que promove a dispersão destes materiais e, conseqüentemente, esboroação dos agregados. Deste modo, a aplicação do polímero diminuiria a resistência do solo pela redução do desarranjo daquelas partículas mais finas do solo.

A relação entre aplicação de polímeros e propriedades físicas do solo, como retenção de água, RT e outras, são explicadas por alguns autores por meio dos processos de adsorção. Há uma corrente de pesquisadores que defendem a teoria de que o polímero quando aplicado ao solo não penetra no agregado, sendo apenas adsorvido na sua superfície externa (NADLER; LETEY, 1989; MALIK; LETEY, 1991; MALIK et al., 1991). Miller et al. (1998) têm outros argumentos, e de forma contrária a esse grupo de pesquisadores, afirmam que o PAM penetra até certo ponto nos agregados e que existe adsorção tanto externa como interna do PAM. Por outro lado, Levy e Miller (1999) sugerem que ambas correntes podem estar corretas, pois atribui ao tamanho dos agregados do solo e seus poros a ocorrência ou não de penetração de polímeros. Pequenos poros devem dificultar a penetração do PAM nos agregados, enquanto aqueles com poros mais largos não devem restringir a sua entrada.

Com base no que foi postulado anteriormente pode-se argumentar que: os efeitos da aplicação do PAM para atenuação do caráter coeso dos solos de Pacajus-CE, por meio de medidas da RT e umidade, sugerem que as concentrações usadas foram relativamente altas, o que promoveu um resultado adverso ao esperado. As altas viscosidades das soluções do PAM devido às concentrações usadas (0,01; 0,05 e 0,10 %), aliada ao menor tamanho dos agregados (diâmetro médio de 22,2 mm), podem ter interferido na adsorção interna do PAM pelos agregados, não ocorrendo penetração (MALIK; LETEY, 1992). Desse modo, pode ter havido apenas uma

adsorção externa, formando uma espécie de revestimento, que promoveu apenas uma melhoria na estabilidade desses agregados (observada nos ensaios qualitativos). Com o aumento da tensão aplicada (0,10 a 1,00 bar) o revestimento formado pelo PAM teve, provavelmente, seu efeito de “capeamento” externo potencializado, aumentando desse modo os valores da RT dos agregados.

Para os agregados dos solos coesos da Austrália, o teste de Tukey indicou 12 grupos de valores (**a** até **l**) que podem ser considerados homogêneos a nível de 5 % de probabilidade. Observa-se que os altos coeficientes de variação (entre 11 e 48%) pode ter sido em função da variabilidade entre as nove repetições para cada tratamento (Tabela 12).

Tabela 12 - Valores médios da resistência tênsil (RT) dos agregados submetidos aos tratamentos com diferentes taxas de polímero, associado com CaSO₄ e CaCl₂

Tratamento	RT (kPa)	CV (%)
D PL 15	462,06 (± 88,57) a	19
D PL 7,5	459,03 (± 48,61) a	11
D PL 30	444,67 (± 68,63) a	15
D PS 12	330,67 (± 75,08) b	23
D	326,63 (±106,23) bc	33
C PS 6	316,18 (± 51,73) bcd	16
C PL 7,5	308,43 (± 39,31) bcd	13
D PS 6	287,98 (± 49,27) bcde	17
C PS 3	274,28 (± 42,48) bcdef	16
C	272,28 (± 46,41) bcdef	17
C PL 15	236,39 (± 45,94) cdefg	19
D PS 3	225,58 (± 35,97) defgh	16
C PL 30	211,23 (± 44,65) efghi	21
C PL 7,5 Cl 5	196,71 (± 46,21) efghi	24
C PS 12	182,55 (± 43,75) fghij	24
D PL 7,5 G 10	172,80 (± 83,17) ghij	48
D PL 7,5 G 5	136,09 (± 32,12) hijk	24
D PL 15 G 5	124,31 (± 33,00) ijkl	27
D G 5	101,12 (± 45,84) jkl	45
D G 10	90,07 (± 24,41) jkl	27
D PL 15 G 10	64,75 (± 13,57) kl	21
C PL 0 Cl 5	32,93 (± 9,57) l	29

Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente ($P<0,05$) pelo teste de Tukey

Observa-se que a aplicação do PAM líquido com água destilada (D PL 7,5; D PL 15 e D PL 30) não teve efeito na diminuição dos valores da RT, quando comparados a partir da testemunha (D). Desse modo, o PAM líquido, quando aplicado aos solos com água destilada, sem a adição de nenhum outro condicionante, promoveu o aumento da RT, não sendo indicado o seu

uso nessas condições. Quando se aplicou as taxas do PAM líquido (7,5 e 15 L ha⁻¹) combinada com as de gesso (5 e 10 t ha⁻¹ de Ca²⁺), ou seja, tratamentos D PL 7,5 G 5, D PL 7,5 G 10, D PL 15 G 5 e D PL 15 G 10, observou-se uma redução significativa nos valores da RT, atenuando de uma média de 455,25 kPa para 64,75 kPa (D PL 15 G 10). Resultados similares são encontrados na literatura (ZAHOW; AMRHEIN, 1992; SHAINBERG; WARRINGTON; RENGASAMY, 1990; SIVAPALAN, 2002; TANG et al., 2006), que recomenda o uso combinado do PAM com gesso, melhorando assim os efeitos benéficos do polímero na redução do caráter coesos de solos.

Embora não tenham sido observadas diferenças significativas entre os valores da RT para os tratamentos PAM líquido + gesso (D PL 15 G 5 e D PL 15 G 10) e aqueles com gesso isoladamente via água destilada (D G 5 e D G 10), a amplitude dos valores foi alta (entre 136,09 e 64,75 kPa). Isto se deve aos altos valores dos coeficientes de variação (entre 21 e 45 %), promovidos pelo número de repetição nestes ensaios (nove para cada tratamento). Ainda com relação ao uso da água destilada nesses ensaios (que simula a água da chuva), nota-se que a aplicação do PAM no estado sólido (distribuído na superfície), na sua menor dose (D PS 3), foi suficiente para reduzir significativamente a RT. Entretanto, com o aumento das dosagens (D PS 6 e D PS 12) não foram observadas diferenças significativas entre os valores de RT destas doses e a do controle (D). Com relação a este fato, Ben-Hur et al. (1989) observou que a penetração e movimento das moléculas do polímero para dentro e entre os microagregados são fatores importantes na determinação do desempenho de condicionadores de agregados do solo. É possível que, com o aumento da taxa do PAM, o seu mecanismo de atuação, ligando os espaços entre os microagregados, tenha sido estabelecido logo após a primeira dosagem.

Avaliando agora o efeito da aplicação da água residuária CSG com os condicionadores químicos, observa-se que a combinação gesso e PAM sólido (PS) só foi significativa para a maior dosagem (C PS 12), reduzindo os valores da RT de 272,28 kPa para 182,55 kPa.

Com relação ao PAM líquido (PL), apenas na aplicação da menor dose (C PL 7,5) não foi observado o efeito positivo na redução da RT, não diferindo do controle (C). A combinação PL e CaCl₂ não resultou em diferenças nos valores da RT, mas quando aplicado isoladamente (C PL 0 Cl 5) o valor foi reduzido significativamente de 272,28 kPa para 32,93 kPa. Green et al. (2000) sugere a adição de CaCl₂ no preparo de soluções de PAM para reduzir sua viscosidade e assim facilitar sua utilização em sistemas de aplicação do modo “spray”.

A seleção do melhor tratamento, que possa este ser reproduzido na prática, com sua aplicação no campo, deve ter como base, além do fator econômico, nem sempre avaliado nos experimentos de laboratório, outros que interferem diretamente na eficiência do PAM. Abordando esse tema, Aly e Letey (1989) comentam sobre o efeito de polímeros na redução do caráter coesos de solos, concluindo que esse efeito dependente do tipo do polímero aplicado, da qualidade da água usada e do tipo de solo. A simples escolha sem a observação desse critério levaria a recomendação do tratamento C PL 0 Cl 5. Porém, a sua aplicação seria inviável, devido ao custo da implantação deste produto na agricultura, no presente momento (MAGDOFF; BRESLER, 1973). Sem estas ressalvas, acredita-se que os resultados obtidos em laboratório não podem ser extrapolados a nível de campo (VACHER, 1999; RAINE; ALLEN, 1998).

Desse modo, avaliando todos esses fatores, pode-se recomendar que, para a melhoria da qualidade física dos solos coesos estudados na Austrália, a recomendação mais satisfatória é a do tratamento com o PAM líquido, na dose 15 L ha^{-1} , combinado com 10 t ha^{-1} de Ca^{2+} , via gesso agrícola, sendo sua incorporação ao solo efetuada com água da chuva, que reduziu a RT de $326,63 \text{ kPa}$ à valores de $64,75 \text{ kPa}$ (D PL 15 G 10).

3 CONCLUSÕES

De acordo com os indicadores da qualidade física do solo determinados neste estudo, seus resultados comprovam parcialmente as hipóteses testadas.

Os métodos alternativos de determinação dos parâmetros físicos do solo, testados neste estudo, foram satisfatoriamente viáveis aos tradicionalmente usados em termos de rapidez, custo e exatidão, facilitando a sua utilização como indicadores da qualidade do solo.

Para a resistência tênsil de agregados do solo estudado, o equipamento IMPAC é um instrumento alternativo ao uso do KALATEC, com exatidão e precisão satisfatórias.

O verniz automotivo Lazzudur é uma excelente alternativa à resina saran na determinação da densidade agregados de solos, sendo o novo método proposto facilmente executado, com menos gastos de insumos e tempo de análise.

O método do hidrômetro, com apenas uma leitura, reuniu melhores condições entre as abordagens na escolha do melhor método para análise granulométrica de solos, devido a sua simplicidade, baixo custo e rapidez nos procedimentos de análises de rotina.

As dosagens do polímero aplicados aos solos coesos de Pacajus-CE não refletiram em reduções da resistência tênsil de seus agregados. Entretanto, para os solos da Austrália, a melhoria da qualidade do solo coeso estudado foi confirmada pelo uso combinado de polímero líquido e gesso na redução da resistência tênsil dos agregados.

REFERÊNCIAS

- ABROL, I.P.; PALTA, J.P. Bulk density determination of soil clods using rubber solution as a coating material. **Soil Science**, New Brunswick, v. 106, n. 6, p. 465-468, 1968.
- ADIKU, S.G.K.; OSEI, G.; AJADEH, T.A.; DOWUONA, G.N. Simplifying the analysis of soil particle size. I. Test of the Sur and Kukal's modified hydrometer method. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, v. 35, n. 13/14, p. 1995-2003, 2004.
- AGNELLI, A.E.; CORTI, G.; AGNELLI, A.; DEL CARLO, P.; COLTELLI, M.; UGOLINI, F.C. Features of some paleosols on the flanks of Etna volcano (Italy) and their origin. **Geoderma**, Amsterdam, v. 142, n. 1/2, p. 112-126, Nov. 2007.
- ALBRECHT, W.A.; MCCALLA, T.M. The colloidal clay fraction of soil as a cultural medium. **American Journal of Botany**, New York, v. 25, n. 6, p. 403-407, June 1938.
- ALLBROOK, R.F. Shrinkage of some New Zealand soils and its implications for soil physics. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 31, p. 111-118, 1992.
- ALY, S.M.; LETEY, J. The effect of two polymers and water qualities on dry cohesive strength of three soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 1, p. 255-259, Jan./Feb. 1989.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **04.08:10-17**: standard test method for particle-size analysis of soils. Philadelphia, 2000.
- ARYA, L.M.; PARIS, F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 6, p. 1023-1030, Nov./Dec. 1981.
- ASHWORTH, J.; KEYES, D.; KIRK, R.; LESSARD, R. Standard procedure in the hydrometer method for particle size analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, v. 32, n. 5/6, p. 633-642, Apr. 2001.
- AUSTRALIA. Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources. **Soil survey standard test method bulk density of a soil: clod method**. Sydney, 2003. Disponível em: <http://naturalresources.nsw.gov.au/care/soil/soil_pubs/soil_tests/pdfs/bdsc.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2008.
- AZEVEDO, T.L.F.; BERTONHA, A.; GONÇALVES, A.C.A.; DE FREITAS, P.L.; REZENDE, R.; FRIZZONE, J.A. Níveis de polímero superabsorvente, frequências de irrigação e crescimento de mudas de café. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1239-1243, 2002.
- BARTH, H.G.; SUN, S-T. Particle size analysis. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 57, n. 5, p. 151R-175R, Apr. 1985.

BARVENIK, F.W. Polycrylamide characteristics related to soil applications. **Soil Science**, New Brunswick, v. 158, n. 4, p. 235-243, Oct. 1994.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil physics**. 4th ed. New York: John Wiley, 1972. 498 p.

BENJAMIN, J.G.; CRUSE, R.M. Measurement of shear strength and bulk density of soil aggregates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 5, p. 1248-1251. Oct. 1985.

BEUSELINCK, L.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DEGRAER, G.; FROYEN, L. Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. **CATENA**, Amsterdam, v. 32, n. 3/4, p. 193-208, Apr. 1998.

BLAKE, G.R. Bulk density. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. pt. 1, p. 374-390. (Series Agronomy, 9).

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 363-375.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Aggregates: tensile strength. In: LAL, R. (Ed.). **Encyclopedia of soil science**. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2006. v. 1, p. 45-48.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; SHIPITALO, M.J. Aggregate disintegration and wettability for long-term management systems in the northern Appalachians. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 3, p. 759-765, May/June 2007.

BLOTT, S.J.; PYE, K. Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. **Sedimentology**, Oxford, v. 53, n. 3, p. 671-685, June 2006.

BOHN, C.C.; GEBHARDT, K. Comparison of hydrometer settling times in soil particle size analysis. **Journal of Range Management**, Baltimore, v. 42, n. 1, p. 81-83, Jan. 1989.

BORKOVEC, M.; WU, Q.; DEGOVICS, G.; LAGGNER, P.; STICHER, H. Surface area and size distributions of soil particles. **Colloids Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 73, p. 65-76, June 1993.

BOUYOUCOS, G.J. The hydrometer as a new method for mechanical analysis of soils. **Soil Science**, New Brunswick, v. 23, n. 5, p. 343-352, Jan./June 1927.

_____. A recalibration of the hydrometer method for mechanical analysis of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 43, n. 9, p. 434-438, Sept. 1951.

_____. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 464-465, Sept./Oct. 1962.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. Harlow: Prentice Hall, 2008. 980 p.

BRASHER, B.R.; FRANZMEIER, D.P.; VALASSIS, V.; DAVIDSON, S.E. Use of saran resin to coat natural soil clods for bulk density and moisture retention measurements. **Soil Science**, New Brunswick, v. 101, n. 2, p. 108, Feb. 1966.

BREUER, J.; SCHWERTMANN, U. Changes to hardsetting proprieties of soil by addition of metal hydroxides. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 50, n. 4, p. 657-664, Dec. 1999.

BUCHAN, G.D.; GREWAL, K.S.; CLAYDON, J.J.; McPHERSON, R.J. A comparison of sedigraph and pipette methods for soil particle-size analysis. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 31, n. 2, p. 407-417, 1993.

BURT, R. **Soil survey laboratory methods manual**; version 4.0. Lincoln: USDA, Natural Resources Conservation Service, 2004. 700 p. (Soil Survey Investigations Report, 42).

BURT, R.; REINSCH, T.G.; MILLER, W.P. A micro-pipette method for water dispersible clay. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, v. 24, n. 19-20, p. 2531-2544, 1993.

BUSSCHER, W.J.; NOVAK, J.M.; CAESAR-TONTHAT, T.C. Organic matter and polyacrylamide amendment of Norfolk loamy sand. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, issue 1, p. 171-178, Mar. 2007.

BUURMAN, P.; PAPE, T.H.; MUGGLER, C.C. Laser grain size determination in soil genetic studies. 1. Practical problems. **Soil Science**, New Brunswick, v. 162, n. 3, p. 211-218, March 1997.

BUZETTO, F.A.; BIZON, J.M.C.; SEIXAS, F. Avaliação do polímero absorvente Stockosorb no fornecimento de água em plantio de *Eucalyptus*. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 195, abr. 2002. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/edicoes.asp>>. Acesso em: 15 jun 2008.

CALHOUN, F.G.; SMECK, N.E.; SLATER, B.L.; BIGHAM, J.M.; HALL, G.F. Predicting bulk density of Ohio soils from morphology, genetic principles, and laboratory characterization data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 811-819, Jan./June 2001.

CAMPBELL, D.J. A flotation method for the rapid measurement of the wet bulk density of soil clods. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v. 24, n. 2, p. 239-243, 1973.

CAUSARANO, H. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p.15-25, Nov. 1993.

CHAKRABORTY, D.; CHAKRABORTY, A.; SANTRA, P.; TOMAR, R. K.; GARG, R. N.; SAHOO, R. N.; CHOUDHURY, S.G.; BHAVANARAYANA, M.; KALRA, N. Prediction of hydraulic conductivity of soils from particle-size distribution. **Current Science**, Bangalore, v. 90, n. 11, p. 1526-1531, June 2006.

CHAN, K.Y. Strength characteristics of a potentially hardsetting soil under pasture and conventional tillage in the semi-arid region of Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 34, n. 2, p. 105-113, May 1995.

_____. Bulk density. In: LAL, R. (Ed.). **Encyclopedia of Soil Science**. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2006. p. 128-130.

CHAN, K.Y.; SIVAPRAGASAM, S. Amelioration of a degraded hardsetting soil using an anionic polymeric conditioner. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 9, n. 1/2, p. 91-100, May 1996.

CHARTRES, C.J.; KIRBY, J.M.; RAUPACH, M. Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in hard-setting soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.54, n. 4, p. 1060-1067, July/Aug. 1990.

CHAUDHARI, S. K.; SINGH, R.; KUNDU, D.K. Rapid textural analysis for saline and alkaline soils with different physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 2, p.431-441, Mar./Apr. 2008.

COMBER, N.M.; DYER, B.; HENDRICK, J.; ROBINSON, G.W.; WALLACE, T.; KEEN, B.A. The mechanical analysis of soils: a report on the present position, and recommendations for a new official method. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 16, n. 1, p. 126-144, Jan. 1926.

COOPER, L.R.; HAVERLAND, R.L.; HENDRICKS, D.M. Microtrac particle-size analyser: an alternative particle-size determination method for sediment and soils. **Soil Science**, New Brunswick, v. 138, n. 2, p. 138-146, Aug. 1984.

COSTA, L.M.; COSTA, O.V.; OLSZEWSKI, N.; NACIF, P.G.S. Influência das características morfológicas, estruturais e texturais do solo na definição do seu preparo In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 205-220.

CRESSWELL, H.P.; HAMILTON, G.J. Bulk density and pore space relations. In: MCKENZIE, N.J.; COUGHLAN, K.J.; CRESSWELL, H.P. (Ed.). **Soil physical measurement and interpretation for land evaluation**. Melbourne: Australian Soil and Land Survey, 2002. p. 35-58. (CSIRO. Handbook Series, 5).

CURRY, A.S. A comparison of methods for determining the volume-weight of soils. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 42, n. 11, p. 765-772, 1931.

DAY P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1965. pt. 1, p. 545-567.

DE FREITAS, P.L.; ZOBEL, R.W.; SNYDER, V.A. A method for studying the effects of soil aggregate and density. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 1, p. 288-290, Jan./Feb. 1996.

DESMET, J.; GABRIELS, D.; DIERICKX, W. Effect of soil conditioners on the permeability and stability of soils. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 36, n. 4, p. 242-248, 1985

DEXTER, A.R. Uniaxial compression of ideal brittle tilths. **Journal of Terramechanics**, Hanover, v. 12, n. 1, p. 3-14, Apr.1975.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v.31, n. 2, p. 139-147, 1985.

DEXTER, A.R.; WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K.; MULLINS, C. (Ed.). **Soil and environmental analysis: physical methods**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2000. chap. 11, p. 401-429.

ELIAS, E.A.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Alternative soil particle-size analysis by gamma-ray attenuation. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v. 52, n. 1/2, p. 121–123, Sept. 1999.

ELLIOTT, E.T.; HEIL, J.W.; KELLY, E.F.; CURTIS MONGER, H. Soil structural and other physical properties. In: ROBERTSON, G.P; BLEDSOE, C.S.; COLEMAN, D.C.; SOLLINS, P. (Ed.). **Standard soil methods for long-term ecological research**. New York: Oxford University Press, 1999. p. 74-85.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.

ESHEL, G.; LEVY, G. J.; MINGELGRIN, U.; SINGER, M. J. Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 3, p. 736–743, May/June 2004.

EYNARD, A.; SCHUMACHER, T.E.; LINDSTROM, M.J.; MALO, D.D.; KOHL, R.A. Effects of aggregate structure and organic C on wettability of Ustolls. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n. 1/2, p. 205-216, July 2006.

FLINT, A.L.; CHILDS, S. Development and calibration of an irregular hole bulk density sampler. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 2, p. 374-378, Mar./Apr. 1984.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. Particle density. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4, p. 229-240. (Book Series, 5).

FREAR, W.; ERB, E.S. Excavation method for determining the apparent specific gravity of soil. **Journal of the Association of Official Agricultural Chemists**, Washington, v. 4, n. 1, p. 103-105, Aug. 1920.

GARDNER, G.H. Water content. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. pt. 1, chap. 7, p. 82-127.

GEE, G.W.; BAUDER J.W. Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measured parameters. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 43, n. 5, p. 1004-1007, Sept./Oct. 1979.

_____. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 383-412.

GEE, G.W.; DODSON, M.E. Soil water content by microwave drying: a routine procedure. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 1234-1237, 1981.

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 255-293. (Book Series, 5).

GEE, G.W.; WARD, A.L.; ZHANG, Z.F.; CAMPBELL, G.S.; MATHISON, J. The influence of hydraulic nonequilibrium on pressure plate data. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 1, n. 1, p. 172-178, Aug. 2002.

GENUCHTEN, M.Th.van. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept./Oct. 1980.

GENUCHTEN, M.Th.van; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**: version 1.1 Riverside: USDA, U. S. Salinity Laboratory, ARS, 1994. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ada/csmos/models/retc.html>>. Acesso em: 01 jun. 2008.

GHANBARIAN, B.; LIAGHAT, A.M. Prediction soil water retention curve from soil particle-size analysis using fractal geometry. **Geophysical Research Abstracts**, Katlenburg, v. 9, 2007. Disponível em: <<http://www.cosis.net/abstracts/EGU2007/11276/EGU2007-J-11276.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2008.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 3, p. 613-620, jul./set. 2002.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; DEXTER, A.R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behaviour. **Geoderma**, Amsterdam, v. 113, n. 1/2, p. 95– 108, Apr. 2003.

GODDARD, T.M.; RUNGE, E.C.A.; WALKER, W.M. Use of soil cores in determining bulk density. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 35, n. 4, p. 660-661, July/Aug. 1971.

GOOSSENS, D. Techniques to measure grain-size distributions of loamy sediments: a comparative study of ten instruments for wet analysis. **Sedimentology**, Oxford, v. 55, n.1, p. 65–96, Feb. 2008.

GREEN, V.S.; STOTT, D.E.; NORTON, L.D.; GRAVEEL, J.G. Polyacrylamide molecular weight and charge effects on infiltration under simulated rainfall. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 5, p. 1786-1791, Sept./Oct. 2000.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 2002, pt. 4, p. 201-225. (Book Series, 5).

GUÉRIF, J. Determination of the tensile-strength of soil aggregates - review and proposal for an improved technique. **Agronomie**, Paris, v. 8, n. 4, p. 281-288, 1988.

_____. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n.1/2, p. 167-178, Apr.1990.

HAISE, R.H.; JENSEN, L.R.; ALESSI, J. The effect of synthetic soil conditioners on soil structure and production of sugar beets. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 19, p. 17-19, 1955.

HARWARD, M.E.; REISENAUER, H.M. Reactions and movement of inorganic soil sulphur. **Soil Science**. New Brunswick, v. 101, n. 4, p. 326-335, 1966.

HELALIA, A.M.; LETEY, J. Polymer type and water quality effects on soil dispersion. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, n. 1, p. 243-246, Jan./Feb. 1988.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 365 p.

HIRMAS, D.R.; FURQUIM, S.A.C. Simple modification of the clod method for determining bulk density of very gravelly soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, v. 37, n. 7/8, p. 899-906, Sept. 2006.

HORN, R.; DEXTER, A.R. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 13, n. 3, p. 253-266, Apr. 1989

HWANG, S.I.; POWERS, S.E. Using particle-size distribution models to estimate soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, n. 4, p. 1103–1112, July/Aug. 2003.

IBARRA, S.Y.; McKYES, E.; BROUGHTON, R.S. Measurement of tensile strength of unsaturated sandy loam soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 15-23, Mar. 2005.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. da; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 5, p. 1656-1661, Sept./Oct. 2002.

INDORANTE, S.J.; FOLLMER, L.R.; HAMMER, R.D.; KOENIG, P.G. Particle-size analysis by a modified pipette procedure. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 2, p. 560-563, Mar.Apr. 1990.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106).

ISRAELSEN, O.W. Studies on capacities of soils for irrigation water and on a new method of determining volume weight. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 13, p. 1-36, Apr./June 1918.

JENNINGS, D.S.; THOMAS, M.D.; GARDNER, W. A new method of mechanical analysis of soils. **Soil Science**, v. 14, n. 6, p. 485-499, July/Dec. 1922.

JOHNSON, M.S. The effects of gel-forming polycrylamides on soil moisture storage in sandy soils. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v.35, n. 11, p.1196-1200, Nov. 1984.

KARSTEN, J.H.M.; KOTZE, W.A.G. Soil particle-size analysis with gamma attenuation technique. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, v. 15, n. 6, p. 731–739, 1984.

KAY, B.D.; DEXTER, A.R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 30, n. 3, p. 297-310, 1992.

KELLER J.M.; GEE, G.W. Comparison of American Society of testing materials and soil science society of america hydrometer methods for particle-size analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 4, p. 1094-1100, July/Aug. 2006.

KETTLER, T.A.; DORAN, J.W.; GILBERT, T.L. Simplified method for soil particle-size determination to accompany soil-quality analyses. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 849–852, May/June 2001.

KISHNÉ, A.S.; MORGAN, C.L.S.; CHANG, H.C.; KISH, L.B. Vibration-induced conductivity fluctuation measurement for soil bulk density analysis. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FLUCTUATIONS AND NOISE, 4.; CONFERENCE NOISE AND FLUCTUATIONS IN CIRCUITS, 1., 2007, Florence. **Proceedings...** Disponível em:

<<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=19911088>>. Acesso em: 05 maio 2008.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, v. 1, p. 635-662.

KONERT, M.; VANDENBERGHE, J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. **Sedimentology**, Oxford, v. 44, n. 3, p. 523-535, June 1997.

KROSLEY, L.; LIKOS W.J.; LU, N. Alternative encasement materials for the clod test. **Geotechnical Testing Journal**, Philadelphia, v. 26, n. 4, p. 461-463, Dec. 2003.

KRUMBEIN, W.C. A history of the principles and methods of mechanical analysis. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v. 2, n. 2, p. 89-124, Aug. 1932.

LAL, R.; SHUKLA, M.K. Basic definitions and concepts: soil components and phases. In: LAL, R. (Ed). **Principles of soil physics**. New York: Marcel Dekker, 2004. p. 15-31.

LAZZURIL. Disponível em: <<http://www.lazzuril.com.br/prodTables.asp?ID=6>>. Acesso em: 20 out. 2006.

LEVIN, J.; BEN-HUR, M.; GAL, M.; LEVY, G.J. Rain energy and soil amendments: Effects on infiltration and erosion of three different soil types. **Australian Journal Soil Research**. Collingwood, v. 29, n. 3, p. 455-465, 1991.

LEVY, G.J.; AGASSI, M. Polymer molecular weight and degree of drying effects on infiltration and erosion of three different soils. **Australian Journal Soil Research**, Collingwood, v. 33, n. 6, p. 1007-1018, 1995.

LEVY, G.J.; MILLER, W.P. Polyacrylamide adsorption and aggregate stability. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.51, n. 1-2, p.121-128, Jul. 1999

LEVY, G.J.; RAPP, I. Polymer effects on surface mechanical strength of a crusting loessial soil. **Australian Journal Soil Research**. Collingwood, v. 37, n. 1, p. 91-101, 1999.

LEVY, G.J.; LEVIN, J.; GAL, M.; BEN-HUR, M.; SHAINBERG, I. Polymer's effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated sprinkler irrigations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 902-907, May/June 1992.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; ROMERO, R.E.; JACOMINE, P.K.T. Comportamento físico de um argissolo acinzentado coeso no estado do ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 33-40, jan./fev. 2005.

LIU, T.K.; ODELL, R.T.; ETTER, W.C.; THORNBURN, T.H. A comparison of clay contents determined by hydrometer and pipette methods using reduced major axis analysis. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 30, n. 6, p. 665-669, Nov./Dec. 1966.

LOVELAND, P.J.; WHALLEY, W.R. Particle size analysis. In: SMITH, K.A.; MULLIN, C.E. (Ed.). **Soil and environmental analysis: physical methods**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2000. chap. 7, p. 281-314.

LUTZ, H.J. Determination of certain physical properties of forest soils. II: Methods utilizing loose samples collected from pits. **Soil Science**, New Brunswick, v. 58, p. 325-333, June/Dec. 1944.

MACYK, T.M.; RICHENS, T.C. **Reclamation criteria for wellsites and associated facilities-update**. Volume III: Technical rationale document. 2004. Disponível em: <<http://www3.gov.ab.ca/env/info/infocentre/publist.cfm>>. Acesso em: 15 mar. 2008.

MADEIRA, M.M.; MARTINS, O.C.; SERRALHEIRO, R.P.; SANTOS, F.L. Conservação do solo e da água em regadio. In: CONGRESO IBÉRICO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DE ÁGUA, 2., 2000, Cidade. Disponível em: <www.unizar.es/fnca/congresos/congreso2/tema1/12.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2008.

MAGDOFF, F.; BRESLER, E. Evaluation of methods for reclaiming sodic soils with CaCl_2 . In: HADAS, A. (Ed.). **Ecological studies: physical aspects of soil water and salt in ecosystems**. Berlin: Springer-Verlag, 1973. p. 441-452.

MALIK, M.; LETEY, J. Adsorption of polyacrylamide and polysaccharide polymers on soil material. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 2, p. 380-383. Mar./Apr. 1991.

_____. Pore-size-dependent apparent viscosity for organic solutes in saturated porous media. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 1032-1035, Jul./Aug. 1992.

MALIK, M.; AMRHEIN, C.; LETEY, J. Polyacrylamide to improve water flow and salt removal in a high shrink-swell soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 6, p. 1664-1667, Nov./Dec. 1991.

MALIK, M.; NADLER, A.; LETEY, J. Mobility of polyacrylamide and polysaccharide polymer through soil materials. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 4, n. 6, p. 255-263, Nov./Dec. 1991.

McCAVE, N.; SYVITSKI, J.P.M. Principles and methods of geological particle size analysis. In: SYVITSKI, J.P.M. (Ed.). **Principles, methods, and application of particle size analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. chap. 1, p. 3-21.

McINTYRE, D.S.; LOVEDAY, J. Bulk density. In: LOVEDAY, J. (Ed.). **Methods for analysis of irrigated soils**. Farnham Royal: Commonwealth Bureau Soils, 1974. p. 38-42. (Technical Communication, 54).

McTAINSH, G.H.; LYNCH, A.W.; HALES, R. Particle-size analysis of aeolian dusts, soils and sediments in very small quantities using a coulter multisizer. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 22, n. 13, p. 1207–1216, 1997.

MENDOZA, M.J.; OROZCO, M. Fast and accurate techniques for determination of water content in soils. **Geotechnical Testing Journal**, Philadelphia, v. 22, n. 4, p. 301–307, Dec. 1999.

MILLER, W.P.; MILLER, D.M. A micro-pipette method for soil mechanical analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, v. 18, n. 1, p. 1-15, 1987.

MILLER, W.P.; RADCLIFFE, D.E.; MILLER, D.M. An historical perspective on the theory and practice of soil mechanical analysis. **Journal of Agronomic Education**, Madison, v. 17, n. 1, p. 24-28, 1988.

MILLER, W.P.; WILLIS, R.L.; LEVY, G.J. Aggregate stabilization in kaolinitic soils by low rates of anionic polyacrylamide. **Soil Use and Management**, v. 14, n. 2, p. 101-105. June 1998.

MINASNY, B.; MCBRATNEYA, A.B.; FIELDA, D.J.; TRANTERA, G.; MCKENZIEB, N.J.; BROUGHC, D.M. Relationships between field texture and particle-size distribution in Australia and their implications. **Australian Journal Soil Research**. Collingwood, v. 45, n. 6, p. 428–437, 2007.

MORAES, O. **Efeito do uso de polímero hidrorretentor no solo sobre o intervalo de irrigação na cultura da alface (*Lactuca sativa* L.)**. 2001. 73 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

MULLER, R.N.; HAMILTON, M.E. A simple, effective method for determining the bulk density of stony soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, v. 23, n. 3/4, p. 313-319, Feb. 1992.

MULLINS, C.E.; PANAYIOTOPOULOS, K.P. The strength of unsaturated mixtures of sand and kaolin and the concept of effective stress. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 35, n. 3, p. 459-468, 1984.

MUNKHOLM, L.J.; KAY, B.D. Effect of water regime on aggregate-tensile strength, rupture energy, and friability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 702–709, May/June 2002.

MURRELL, M.L. **An investigation of prehistoric water management in the chupadera arroyo basin, Central New Mexico.** Las Cruces: New Mexico State University, Water Resources Research Institute, 2006. 127 p. Disponível em: <http://wrri.nmsu.edu/research/rfp/studentgrants05/studentresearch05.html>>. Acesso em 05 jan. 2008.

NADLER, A.; LETEY, J. Adsorption isotherms of polyanions on soils using tritium-labeled compounds. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 5, p. 1375-1378, Sept./Oct. 1989.

NEVES JUNIOR, A.F. **Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central.** 2008. 93 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

NIMAH, N.M.; RYAN, J.; CHAUDHRY, M.A. Effect of synthetic conditioners on soil water retention, hydraulic conductivity, porosity, and aggregation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 4, p.742-745, July/Aug. 1983.

NISHIMURA, T.; YAMAMOTO, T.; SUZUKI, S.; KATO, M. Effect of gypsum and polyacrylamide application on erodibility of an acid Kunigami mahji soil. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 51, n. 5, p. 641-644, Sept. 2005.

OADES, J.M.; WATERS, A.G. Aggregate hierarchy in soils. **Australian Journal Soil Research**, Collingwood, v. 29, n. 6, p. 815-828, 1991.

OLIVEIRA, J.C.M.; VAZ, C.M.P.; REICHARDT, K.; SWARTZENDRUBER, D. Improved soil particle-size analysis by gamma-ray attenuation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 23-26, Jan./Feb. 1997.

OLIVEIRA, R.A.; REZENDE, L.S.; MARTINEZ, M.A.; MIRANDA, G.V. Influência de um polímero hidroabsorvente sobre a retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.1, p.160-163, jan./abr. 2004.

OSTER, J. D.; TANJI, K. K. Chemical reactions within the root zone of arid zone soils. **Journal of Irrigation Drainage Engineering**, New York, v. 111, n. 3, p. 207-217, Sept. 1985.

ÖZTAS, T; SÖNMEZ, K; CANBOLAT, M.Y. Strength of individual soil aggregates against crushing forces. I. Influence of aggregate characteristics. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry Sciences**, v. 23, n. 6, p. 567-572, Dec. 1999.

PERFECT, E.; MCKAY, L.D.; CROPPER, S.C.; DRIESE, S.G.; KAMMERER, G.; DANE, J.H. Capillary pressure-saturation relations for saprolite: scaling with and without correction for column height. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 3, n. 2, p. 493-501, May 2004.

PERRY, E.P. A simple rapid method of determining the apparent density of soil aggregate. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 7, n. 1, p. 409-411, 1942.

PREVEDELLO, C.L.; BALENA, S.P. Efeito de polímeros hidrorretentores nas propriedades físico-hídricas de dois meios porosos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n.2, p. 251-258, abr./jun. 2000.

PRIKNER, P.; LACHNIT, F.; DVOŘÁK, F. A new soil core sampler for determination bulk density in soil profile. **Plant Soil and Environment**, Slezská, v. 50, n. 6, p. 250–256, June 2004.

RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJIK, F. Effect of soil organic matter, eletrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 3/4, p. 145-153, Apr. 2000.

RAINE, S.R.; ALLEN, R.A. The effect of polyacrylamide application and pre-wetting exposure period on infiltration and erosion from disturbed lands. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING IN AGRICULTURE; 1998, Perth, **Proceedings...** Perth: The University of Western Australia, 1998. Paper No. SEAg 98/027.

REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO E APLICAÇÃO DE LEVANTAMENTOS DE SOLOS, 6., 2000. **Guia de excursão de estudos de solos nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná**. Colombo: EMBRAPA Florestas; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos; Campinas: IAC, 2000. 222 p. (Documentos).

RICHARDS, L.A. Modulus of rupture as an index of crusting of soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 17, n. 4, p. 321-323, Oct. 1953.

ROBINSON, G.W. New method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 12, p. 306-321, 1922.

ROGOWSKI, A.S.; MOLDENHAUER, W.C.; KIRKHAM, D. Rupture parameters of soil aggregates. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 32, n. 5, p. 720-724, Sept./Oct. 1968.

ROSA JUNIOR, E.J.; MARTINS, R.M.G.; ROSA, Y.B.C.J.; CREMON, C. Calcário e gesso como condicionantes físico e químico de um solo de cerrado sob três sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, n. 1, p. 37-44, 2006.

RUSSELL, E.W. **Russell's soil conditions and plant growth**. 11th ed. New York: Longman Scientific & Technical, 1988. 991 p.

RYŽAK, M.; BIEGANOWSKI, A.; WALCZAK, R.T. Application of laser diffraction method for determination of particle size distribution of grey-brown podzolic soil. **Research Agricultural Engineering**, v. 53, n. 1, p. 34–38, 2007.

SALTER, P.J.; BERRY, G.; WILLIAMS, J.B. Influence of texture on the moisture characteristics of soils. III. Quantitative relationships between particle size, composition, and available-water capacity. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 17, n. 1, p. 93-98, 1966.

SANDER, T.; GERKE, H.H. Noncontact shrinkage curve determination for soil clods and aggregates by three-dimensional optical scanning. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 5, p. 1448-1454, Sept./Oct. 2007.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.

SARLI, G.O.; FILGUEIRA, R.R.; GIMÉNEZ, D. Measurement of soil aggregate density by volume displacement in two non-mixing liquids. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 5, p. 1400-1403, Sept./Oct. 2001.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**: user's guide; version 8.2, Cary, 2001. 943 p.

SCANLON, B.R.; ANDRASKI, B.J.; BILSKIE, J. Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: DANE, J.H; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4. Physical methods, chap. 3, p. 643-970.

SCHAMP, N.; HUYLEBROECK, J. SADONES, M. Adhesion and adsorption phenomena in soil conditioning. In: MODLDENHAUER, W.C. (Ed.). **Soil conditioners**. Madison: Soil Science Society of America, 1975. chap. 2, p. 13-24.

SHAINBERG, I.; LEVY, G.J. Organic polymers and soil sealing in cultivated soils. **Soil Science**, New Brunswick, v. 158, n. 4, p. 267-273, Oct. 1994.

SHAINBERG, I.; WARRINGTON, D.; RENGASAMY, P. Water quality and PAM interactions in reducing surface sealing. **Soil Science**, New Brunswick, v. 149, n. 5, p. 301-307, Jan./June 1990.

SHAW, C.F. A method for determining the volume weight of soils in field condition. **Journal of the American Society of Agronomy**, Washington, v. 9, n. 1, p. 38-42, Jan. 1917.

SHIPP, R.F.; MATELSKI, R.P. Bulk density and coarse fragment determinations on some Pennsylvania soils. **Soil Science**, New Brunswick, v. 99, n. 6, p. 392-397, Jan./June 1965.

SILVA, E.M.B.; SILVA, T.J.A.; OLIVEIRA, L.B.; MELO, R.F.; JACOMINE, P.K.T. Utilização de cera de abelhas na determinação da densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 955-959, set./out. 2003.

SIVAPALAN, S. Potential use of polyacrylamides (PAM) in Australian irrigated agriculture. In: IRRIGATION AUSTRALIA 2002 CONFERENCE, 2002, Sydney. **Proceedings...** Sydney, 2002. p. 339-346.

_____. Effect of gypsum and polyacrylamides on water turbidity and infiltration in a sodic soil. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, n. 6, p. 723-733, 2005.

_____. Benefits of treating a sandy soil with a crosslinked type polyacrylamide. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 46, n. 4, p. 579-584, 2006.

SMITH, H.J.C.; LEVY, G.J.; SHAINBERG, I. Water-droplet energy and soil amendments: effect on infiltration and erosion. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 4, p. 1084-1087, July/Aug. 1990.

SOJKA, R.E.; LENTZ, R.D. Time for yet another look at soil conditioners. **Soil Science**, New Brunswick, v. 158, n. 4, p. 233-234, Oct. 1994.

SOJKA, R.E.; SURAPANENI, A. **Potential use of polyacrylamide (PAM) in Australian agriculture to improve off and on-site environmental impacts and infiltration management**. Tatura: Institute for Sustainable Irrigated Agriculture, 2000. 39 p. (Final Report UNE39).

SOJKA, R.E.; ENTRY, J.A.; ORTS, W.J. **Conditioners**. 2005. p. 301-306. Disponível em: <<http://books.elsevier.com/companions/defaultindividual.asp?isbn=9780123485366>>. Acesso em: 25 mar. 2008.

STARR, G.C.; BARAK, P.; LOWERY, B.; AVILA-SEGURA, M. Soil particle concentrations and size analysis using a dielectric method. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 3, p. 858-866, May/June 2000.

STOKES, G.G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. **Transaction of the Cambridge Philosophical Society**, Cambridge, v. 9, n. 2, p. 8-106, 1851.

SUR, H.S.; KUKAL, S.S. A modified hydrometer procedure for particle size analysis. **Soil Science**, New Brunswick, v. 153, n. 1, p. 1-4, Jan. 1992.

SUR, H.S.; SINGH, N.T.; MAHLI, S.S. An examination of hydrometer and other methods for particle size determination in different soils. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, New Delhi, v. 25, n. 2, p. 107-111, 1977.

SYVITSKI, J.P.M. **Principles, methods, and application of particle size analysis**. New York: Cambridge University Press, 1991. 368 p.

TAN, K.H. **Soil sampling, preparation and analysis**. New York: Marcel Dekker, 1996. 408 p.

TANG, Z.; LEI, T.; YU, J.; SHAINBERG, I.; MAMEDOV, A.I.; BEN-HUR, M.; LEVY, G.J. Runoff and interrill erosion in sodic soils treated with dry PAM and phosphogypsum. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 2, p. 679-690, Mar./Apr. 2006.

TEO, J.A.; RAY, C.; EL-SWAIFY, S. Screening of polymers on selected Hawaii soils for erosion reduction and particle settling. **Hydrological Process**, Hoboken, v. 20, n. 1, p. 109-125, Jan. 2006.

TERRY, T.A.; CASSEL, D.K.; WOLLUM, A.G. Effects of soil sample size and included root and wood on bulk density in forested soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 1, p. 135-138, Jan./Feb. 1981.

TEXTURE AUTOLOOKUP - TAL FOR WINDOWS. Version 4.2. Disponível em: <http://www.download.com/Texture-AutoLookup-TAL-/3000-2054_4-10144157.html>. Acesso em: 20 jul. 2008.

TIMM, L.C.; PIRES, L.F.; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; OLIVEIRA, J.C.M.; BACCHI, O.O.S. Soil bulk density evaluation by conventional and nuclear methods. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 43, n. 1, p. 97-103, 2005.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 33-42, fev. 2008.

UHLAND, R.E. Physical properties of soils as modified by crops and management. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 14, n. 1, p. 361-366, 1949.

URBANEK, E.; HORN, R. Changes in soil organic matter, bulk density and tensile strength of aggregates after percolation in soils after conservation and conventional tillage. **International Agrophysics**, Budapest, v. 20, n. 3, p. 245-254, Sept. 2006.

UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R. Soil friability. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 32, n. 2, p. 203-213, 1981.

VACHER, C.A. **The stabilization of disturbed lands using polyacrylamides: erosion control of Iluka resources' capel site**. 1999. Dissertation (Bachelor of Civil Engineering) – Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Toowoomba, 1999.

VALE, G.F.R.; CARVALHO, S.P.; PAIVA, L.C. Avaliação da eficiência de polímeros hidrorretentores no desenvolvimento do cafeeiro em pós-plantio. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 1, p. 7-13, abr./jun. 2006.

VAN BAVEL, G.H.M.; UNDERWOOD, N.; RAGAR, S.R. Transmission of gamma radiation by soils and soil densitometry. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v. 21, n. 6, p. 588-591, Nov./Dec. 1957.

VINCENT, K.R.; CHADWICK, O.A. Synthesizing bulk density for soils with abundant rock fragments. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 2, p. 455-464, Mar./Apr. 1994.

VOMOCIL, J.A. In situ measurement of soil bulk density of by gamma-ray absorption technique. **Soil Science**, New Brunswick, v. 77, n. 4, p. 341-342, 1954.

VULAVA, V.M.; MCKAY, L.D.; DRIESE, S.G.; MENN, F.M.; SAYLER, G.S. Distribution and transport of coal tar-derived PAHs in fine-grained residuum. **Chemosphere**, Oxford, v. 68, n. 3, p. 554-563, June 2007.

WALLACE, A.; WALLACE, G.A. Need for solution or exchangeable calcium and/or critical EC level for flocculation of clay by polyacrylamides. In: **MANAGING IRRIGATION-INDUCED EROSION AND INFILTRATION WITH POLYACRYLAMIDE**, 1996, Twin Falls.

Proceedings... Twin Falls: University of Idaho, 1996. p. 59-63. (Publication, 101-196).

WALLACE, A.; WALLACE G.A.; ABOUZAMZAM, A.M. Amelioration of soil sodic with polymers. **Soil Science**, New Brunswick, v. 141, n. 5, p. 359-362, May 1986.

WALLACE, G.A.; WALLACE, A. Control of soil-erosion by polymeric soil conditioners. **Soil Science**, New Brunswick, v. 141, n. 5, p. 363-367, May 1986.

WALTER, N.F.; HALLBERG, G.R.; FENTON, T.S. Particle size analysis by the Iowa State University: soil survey laboratory. In: HALLBERG, G.R. (Ed.). **Standard procedures for evaluation of quaternary materials in Iowa**. Ames: Iowa Geological Survey, 1978. p. 61-74. (Technical Information Series, 8).

WATTS, C.; DEXTER, A.R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 49, n. 1, p.73-84, Mar. 1998.

WELCH, N.H.; ALLEN, P.B.; GALINDO D.J. Particle-size analysis by pipette and sedigraph. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 8, n. 4, p. 543-546, 1979.

WHALLEY, W.R.; LEEDS-HARRISON, P.B.; CLARK, L.J.; GOWING; D.J.G. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, n. 1, p. 18-27, Nov. 2005.

WU, Q.; BORKOVEC, M.; STICHER, H. On particle-size distributions in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 4, p. 883-890, July/Aug. 1993.

YOUNG, I.M.; MULLINS, C.E. Factors affecting the strength of undisturbed cores from soils with low structural stability. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 42, n. 2, p. 205-217, June 1991a.

_____. Water-suspensible solids and structural stability. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 1, p. 89-94 Jan. 1991b.

ZAHOW; M.F.; AMRHEIN, C. Reclamation of a saline sodic soil using synthetic polymers and gypsum. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 1257-1260, July/Aug. 1992.