

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA**

**PAULO RENATO ORLANDI LASSO**

**Avaliação da utilização de resíduos de construção civil e de  
demolição reciclados (RCD-R) como corretivos de acidez e  
condicionadores de solo**

**Piracicaba  
2011**

**PAULO RENATO ORLANDI LASSO**

**Avaliação da utilização de resíduos de construção civil e de  
demolição reciclados (RCD-R) como corretivos de acidez e  
condicionadores de solo**

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Osny Oliveira Santos Bacchi

Co-Orientador: Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz

**Piracicaba  
2011**

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP**

Lasso, Paulo Renato Orlandi

Avaliação da utilização de resíduos de construção civil e de demolição reciclados (RCD-R) como corretivos de acidez e condicionadores de solo / Paulo Renato Orlandi Lasso; orientador Osny Oliveira Santos Bacchi, co-orientador Carlos Manoel Pedro Vaz. - - Piracicaba, 2011.

122 p.: il.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Acidez do solo 2. Calcário 3. Física do solo 4. Política ambiental  
5. Porosidade do solo 6. Reciclagem de resíduos urbanos 7. Resíduos sólidos  
8. Umidade do solo I. Título

CDU 628.4.043:631.41/43

## DEDICATÓRIA

À minha amada esposa Katia,  
fiel companheira e incentivadora.

Aos meus amados filhos,  
Jemima, Débora e Calebe.

Aos meus amados pais e primeiros professores  
Renato e Olga.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar e acima de tudo, a DEUS, meu Senhor e Pai, que efetua em todos nós tanto o querer como o realizar, capacitando-nos para toda boa obra. (Filipenses 2.13)

Aos Orientadores Prof. Dr. Osny Oliveira Santos Bacchi e Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz pelo incentivo, pela amizade e excelente orientação fornecida para elaboração deste trabalho.

Ao Dr. Caue Ribeiro, pela amizade e colaboração nas questões de análise dos materiais.

Ao Dr. Alberto Bernardi, pela amizade e colaboração nas questões agronômicas.

À colega Juliana Manieri Varandas, pela amizade, colaboração, incentivo e companhia nas inúmeras viagens de São Carlos a Piracicaba.

Aos estagiários José Renato do Guanor, Rodrigo Donizeti Cardoso e Wilton Hirotochi Mochida Júnior pela colaboração na montagem e condução dos experimentos.

À minha mãe, Professora de Português, Maria Olga Orlandi Lasso, pela correção ortográfica e gramatical do texto deste trabalho, pelo grande incentivo e torcida.

A todos os amigos e colegas da Embrapa Instrumentação que, de forma direta ou indireta, colaboraram, em especial aos colegas Dr. Ladislau Martin Neto e Dra. Débora Milori pelo apoio através da Rede Agrorecicla, ao colega MSc. Ednaldo José Ferreira pelo apoio nas questões de estatística, à colega Valéria de Fátima Cardoso pelo apoio na correção e adequação à norma das referências bibliográficas, ao Chefe Geral Dr. Luiz Alberto Capparelli Mattoso e Chefes de Apoio Dr. João de Mendonça Naime e MSc. Odemilson Fernando Sentanin pelo apoio institucional.

À Bibliotecária Chefe do CENA, Marília Ribeiro Garcia Henyei, pela correção e formatação final da desta tese e também pela simpatia e grande disposição em ajudar.

À Progresso e Habitação de São Carlos S. A. – PROHAB que administra a usina de reciclagem de resíduos de construção civil, na pessoa do seu Diretor, Eng. Samir Fagury, pela boa receptividade e fornecimento dos RCD-R utilizados neste trabalho.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA e à Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP pelo apoio institucional e financeiro.

## RESUMO

LASSO, P. R. O. **Avaliação da utilização de resíduos de construção civil e de demolição reciclados (RCD-R) como corretivos de acidez e condicionadores de solo.** 2011. 122 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2011.

Os resíduos de construção civil e demolição (RCD) constituem-se em um grande problema ambiental, pois representam mais de 50% do resíduo sólido gerado nos médios e grandes centros urbanos, sendo que a maior parte deste resíduo acaba tendo uma disposição final irregular. Isso causa sérios impactos ambientais como degradação das áreas de manancial e proteção permanente, proliferação de agentes transmissores de doenças, assoreamento de rios e córregos, obstrução dos sistemas de drenagem, ocupação de vias e logradouros públicos e degradação da paisagem urbana. Caso esse material seja disposto em aterros, pode reduzir drasticamente a vida útil dos mesmos. Como alternativa, usinas de reciclagem têm moído este resíduo, produzindo o RCD reciclado, ou RCD-R, que tem sido utilizado na própria construção civil. Por outro lado, a acidez do solo é um dos principais fatores capazes de reduzir o potencial produtivo dos solos brasileiros, pois provoca a diminuição da disponibilidade de nutrientes para as plantas. Além disso, solos arenosos são encontrados em quase todo o território nacional e apresentam características desfavoráveis como a baixa capacidade de retenção de água e grandes perdas de nutrientes por percolação que proporcionam baixas produtividades. Neste trabalho o RCD-R produzido pela Usina de Reciclagem de São Carlos, SP, que é dividido em dois tipos: cinza e vermelho, foi caracterizado pelas técnicas de FRX, DRX, medidas dos teores de CaO e MgO, PN e PRNT e análise granulométrica por radiação gama. Foi avaliada a utilização deste RCD-R como corretivo de acidez e condicionador para aumento da capacidade de retenção de água no solo por meio de um experimento de plantio de alfafa em um solo LVAd textura média, ácido e de baixa fertilidade com doses de 10, 20 e 40% de RCD-R, em massa. Foi avaliada a produção de matéria seca de alfafa, a fertilidade química do solo, a capacidade de retenção de água, macro e microporosidade do solo por meio das curvas características de retenção de água e por microtomografia de raios X. Concluiu-se que o RCD-R cinza neutraliza a acidez e carrega cálcio e magnésio para o solo, tendo potencial para ser utilizado como corretivo da acidez do solo e que o RCD-R vermelho aumenta a capacidade de retenção de água, tendo potencial para ser utilizado como condicionador de solo. Devido às doses necessárias, a utilização desses RCD-R mostrou-se interessante em áreas como jardinagem, na composição de substratos para plantio em vasos ou na preparação de covas para culturas permanentes.

Palavras-chave: Resíduo de construção e demolição reciclados (RCD-R). Corretivo de acidez do solo. Condicionador de solo.

## ABSTRACT

LASSO, P. R. O. **Evaluation and use of recycled construction and demolition residue (RCDR) as acidity corrective and soil conditioner.** 2011. 122 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2011.

Construction and demolition residues (CDR) are an important environmental issue because they represent more than 50% of solid waste produced in medium and big cities, where most of this waste ends up having an irregular final disposition. This causes serious environmental impacts as the degradation of water sources and permanent protection areas, proliferation of disease agents, clogging of drainage systems, occupation of public roads and degradation of the urban landscape. Moreover, if such material is disposed in landfills it can drastically reduce their lifetime. Alternatively, CDR has been processed by mills and used as recycled material (RCDR) in the construction sector. Soil acidity is one of the main aspects that reduce the productive potential of the Brazilian soils because it causes a decreasing availability of nutrients for plants. Furthermore, sandy soils are very common in Brazil and have unfavorable characteristics such as low water retention capacity and high nutrient losses by leaching, providing, generally, low crop yields. In this work, the RCDR produced by the Recycling Plant of São Carlos, SP, which is divided into gray and red materials, were mineralogically, physically and chemically characterized. It was evaluated the use of the RCDR materials as a corrective for the soil acidity and as a conditioner to increase the soil water retention capacity by means of an experimental planting trial with alfalfa in a LVAd acidic and low fertility soil, at 10, 20 and 40% (m/m) doses of RCDR. Parameters evaluated were dry matter production, the soil chemical fertility, water holding capacity and macro and microporosity of soil samples from the water-potential characteristic curves and X-ray microtomography. It was concluded that the gray RCDR neutralizes the acidity and adds calcium and magnesium to the soil, having the potential to be used as corrective of soil acidity and the red RCDR increases the soil water retention capacity, presenting a potential to be used as soil conditioner. Due to the doses used in the experiment, the RCDR proved to be interesting for use in gardening, substrate composition for planting in pots or in the preparation of pits for permanent crops.

**Keywords:** Recycled construction and demolition residue (RCDR). Soil acidity corrective. Soil conditioner.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Separação da fração líquida de um volume de solo XYZ.....	34
Figura 2 - RCD disposto às margens de um córrego (a esquerda) e obstruindo uma via pública (a direita) .....	39
Figura 3 - Representação espacial das unidades básicas das argilas: tetraedro de silício (a) e octaedro de alumínio (b) .....	44
Figura 4 - Estrutura atômica dos minerais 1:1 (a) e 2:1 (b) .....	45
Figura 5 - (A) Frente da Usina de Reciclagem da PROHAB em São Carlos - SP, (B) vista do terminal de saída da esteira que carrega o material processado e do monte formado por este material, (C) material cinza de base concreto já separado, antes do processamento, (D) material vermelho de base cerâmica (chamote) já separado, antes do processamento, (E) material cinza já processado e peneirado em malha de 2mm e (F) material vermelho já processado e peneirado em malha de 2mm.....	49
Figura 6 - Espectrômetro de Fluorescência de Raios X da marca Panalytical utilizado.....	52
Figura 7 - (A) Difratômetro de raios X da marca Shimadzu, modelo XRD-6000 utilizado e (B) porta-amostras utilizado.....	54
Figura 8 - (A) Moinho fabricado pela Servitch, modelo CT 242, utilizado na moagem adicional do RCD-R e (B) um dos jarros do moinho com as bolas e o RCD-R em processo de moagem .....	55
Figura 9 - RCD-R dos tipos cinza fino (CF), cinza grosso (CG), vermelho fino (VF) e vermelho grosso (VG).....	55
Figura 10 - Plantio de alfafa em casa de vegetação da Embrapa Pecuária Sudeste em São Carlos, SP .....	57
Figura 11 - Conjuntos de câmaras de Richards do IAC, utilizados neste experimento .....	61
Figura 12 - Cronograma do experimento com plantio de alfafa ( <i>Medicago sativa</i> cv. Crioula) .....	61
Figura 13 - Analisador granulométrico automático desenvolvido na Embrapa Instrumentação .....	62
Figura 14 - Microtomógrafo SkyScan, modelo 1172, instalado na Embrapa Instrumentação.....	64
Figura 15 - Tela do <i>software</i> CTAn da SkyScan com exemplo de região de interesse (ROI) selecionada para análise .....	65
Figura 16 - Tela do <i>software</i> CTAn da SkyScan com exemplo de um corte da imagem binária da ROI selecionada.....	66

Figura 17 - Curvas de umidade de um Neossolo Quartzarênico Órtico (solo arenoso) puro e com a adição das doses 10, 20, 30 e 100% do RCD-R cinza, durante a sua secagem. É apresentada também a curva de umidade de um Nitossolo Vermelho Eutroférico (solo argiloso) sem adição do RCD-R .....	68
Figura 18 - Curvas de umidade de um Neossolo Quartzarênico Órtico (solo arenoso) puro e com a adição das doses 10, 20, 30 e 100% do RCD-R vermelho, durante a sua secagem. É apresentada também a curva de umidade de um Nitossolo Vermelho Eutroférico (solo argiloso) sem adição do RCD-R .....	69
Figura 19 - Difratoograma do RCD-R cinza .....	74
Figura 20 - Difratoograma do RCD-R vermelho.....	74
Figura 21 - Curvas da distribuição granulométrica de CF, CG, VF e VG .....	78
Figura 22 - Curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos CF10, CF20 e CF40.....	79
Figura 23 - Curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos CG10, CG20 e CG40 .....	80
Figura 24 - Curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40 .....	81
Figura 25 - Curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40 .....	82
Figura 26 - Curvas características de retenção de água, medida e ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40, referentes à amostragem A .....	88
Figura 27 - Curvas características de retenção de água, medida e ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40, referentes à amostragem A .....	89
Figura 28 - Curvas de retenção de água, ajustadas, do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40, para a amostragem A.....	90
Figura 29 - Curvas de retenção de água, ajustadas, do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40, para a amostragem A.....	90
Figura 30 - Curvas características de retenção de água, medida e ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40, referentes à amostragem B .....	91
Figura 31 - Curvas características de retenção de água, medida e ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40, referentes à amostragem B. ....	92
Figura 32 - Curvas de retenção de água, ajustadas, do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40, para a amostragem B.....	93

Figura 33 - Curvas de retenção de água, ajustadas, do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40, para a amostragem B .....	93
Figura 34 - Cortes microtomográficos referentes à primeira amostragem (A) do solo dos tratamentos solo natural, VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40 .....	96
Figura 35 - Cortes microtomográficos referentes à segunda amostragem (B) do solo dos tratamentos solo natural, VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40 .....	97
Figura 36 - Curva de correlação entre as medidas de porosidade por microTC e as medidas de macroporosidade por CR, para a amostragem A .....	100
Figura 37 - Curva de correlação entre as medidas de porosidade por microTC e as medidas de macroporosidade por CR, para a amostragem B .....	101
Figura 38 - Total acumulado, por vaso, da produção de matéria seca de alfafa (MS), referente aos sete cortes em função das doses dos RCD-R cinzas aplicadas .....	102
Figura 39 - Total acumulado, por vaso, da produção de matéria seca de alfafa (MS), referente aos sete cortes em função das doses dos RCD-R vermelhos aplicadas .....	103
Figura 40 - Total acumulado, por vaso, da produção de matéria seca de alfafa (MS) dos sete cortes para os tratamentos com as doses de 20% de VF e VG e a testemunha V% 80, com estresse hídrico (irrigação a cada dois dias) .....	105
Figura 41 - Resultados de MS obtidos para os RCD-R vermelhos na situação de estresse hídrico e na sua ausência .....	106
Figura 42 - Gráfico comparativo entre os valores de MS medidos e estimados por meio do modelo representado pela Equação 33, para os tratamentos CF, CG, VF e VG .....	107
Figura 43 - Dependência do pH com a dose para os tratamentos CF 30d, CG 30d, CF 120d, CG 120d, Calc 30d e Calc 120d .....	109
Figura 44 - Dependência da CTC com a dose para os tratamentos CF 30d, CG 30d, CF 120d, CG 120d, Calc 30d e Calc 120d .....	110
Figura 45 - Dependência da V% com a dose para os tratamentos CF 30d, CG 30d, CF 120d, CG 120d, Calc 30d e Calc 120d .....	111
Figura 46 - Curvas da saturação por bases em função da dose, medida e estimada pelo modelo da Equação 34, para os tratamentos com CF e CG - detalhamento para doses baixas.....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa de variação percentual na assimilação dos principais nutrientes pelas plantas, em função do pH do solo .....	21
Tabela 2 - Capacidade de neutralização de diferentes espécies neutralizantes, em relação ao CaCO <sub>3</sub> .....	24
Tabela 3 - Taxas de reatividade das partículas de diferentes tamanhos dos calcários, adotados pela legislação brasileira .....	26
Tabela 4 - Valores mínimos de PN, %CaO + %MgO e PRNT exigidos pela legislação brasileira para registro e comercialização de corretivos de pH do solo.....	28
Tabela 5 - Relação entre densidade global e porosidade de um solo com $\rho_p = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$	31
Tabela 6 - Participação de RCD no total de resíduos sólidos gerados em alguns municípios do estado de São Paulo.....	38
Tabela 7 - Custos de gerenciamento de resíduos de construção em alguns municípios.....	40
Tabela 8 - Municípios brasileiros que possuem usinas de reciclagem de RCD instaladas ..	40
Tabela 9 - Composição química média dos cimentos portland brasileiros .....	43
Tabela 10 - Características de algumas argilas.....	46
Tabela 11 – Teores de elementos potencialmente tóxicos encontrados em amostras de RCD-R cinza e vermelho produzidos pela Usina de Reciclagem da Prohab no município de São Carlos – SP e valores de alerta .....	47
Tabela 12 – Datas das coletas de amostras dos RCD-R cinza e vermelho e nomenclatura adotada para estas amostras .....	51
Tabela 13 – Nomenclatura adotada para os tratamentos com os RCD-R dos tipos CF e CG .....	58
Tabela 14 – Nomenclatura adotada para os tratamentos com os RCD-R dos tipos VF e VG .....	59
Tabela 15 – Resultados preliminares da análise química dos resíduos cinza e vermelho reciclados .....	70
Tabela 16 – Resultados das análises de FRX das amostras de cinza 1, 2, 3, 4 e 5.....	71
Tabela 17 – Resultados das análises de FRX das amostras de vermelho 1, 2, 3, 4 e 5....	72
Tabela 18 - Resultados das medidas dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT das amostras cinza 1, cinza 2 e cinza 3.....	75

Tabela 20 - Resultados das medidas dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT de CF e CG 77	
Tabela 21 - Frações granulométricas 2mm a 50 $\mu$ m (areia), 50 a 2 $\mu$ m (silte) e abaixo de 2 $\mu$ m (argila) obtidas para os RCD-R dos tipos CF, CG, VF e VG .....	83
Tabela 22 - Frações granulométricas areia, silte e argila obtidas para os solos dos vasos dos seguintes tratamentos: solo natural, CF10, CF20, CF40, CG10, CG20, CG40, VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40 .....	83
Tabela 23 - Resultados da análise química de fertilidade do solo das amostragens A, B e C dos vasos com os tratamentos: solo natural, CF10, CF20, CF40, CG10, CG20, CG40, VF10, VF20, VF40, VG10, VG20, VG40, V% 60 e V% 80 .....	85
Tabela 24 – pH, soma de bases (S) e CTC do solo do fundo dos vasos com os tratamentos CF40, CG40, VF40 e VG40, referente à amostragem C. ....	85
Tabela 25 - Valores dos parâmetros de ajuste ao modelo de van Genuchten (1980) para o solo natural e para os solos dos tratamentos VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40, referentes à amostragem A .....	89
Tabela 26 - Valores dos parâmetros de ajuste ao modelo de van Genuchten (1980) para o solo natural e para os solos dos tratamentos VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40, referentes à amostragem B .....	92
Tabela 27 – Resultados obtidos por meio da curva característica de retenção de água de amostras indeformadas do solo dos vasos dos tratamentos com RCD-R vermelho, referentes à amostragem A .....	94
Tabela 28 – Resultados obtidos por meio da curva característica de retenção de água de amostras indeformadas do solo dos vasos dos tratamentos com RCD-R vermelho, referentes à amostragem B .....	94
Tabela 29 – Porosidades obtidas por microTC para os tratamentos com os RCD-R vermelhos .....	98
Tabela 30 – Comparativo entre porosidades obtidas pelo método da curva de retenção (CR) e por microTC para a primeira amostragem (A) .....	99
Tabela 31 – Comparativo entre porosidades obtidas pelo método da curva de retenção (CR) e por microTC para a segunda amostragem (B) .....	99
Tabela 32 - Valores dos parâmetros de ajuste ao modelo representado pela Equação 33 para os tratamentos CF, CG, VF e VG .....	107

**LISTA DE SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
CAD	Capacidade de água disponível
CC	Capacidade de campo
CF	Cinza fino
CG	Cinza grosso
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CR	Curva característica de retenção de água
CRA	Capacidade de retenção de água
CTC	Capacidade de troca de cátions
CV	Coefficiente de variação
DP	Desvio padrão
DRX	Difratometria de Raios X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FRX	Fluorescência de Raios X
ICP - AES	Plasma Acoplado Indutivo - Espectrometria de Emissão Atômica
IN	Instrução Normativa
LVA	Latossolo vermelho amarelo
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Micro TC	Microtomografia Computadorizada
MS	Produção de matéria seca
PMP	Ponto de murcha permanente
PN	Poder de neutralização
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRNT	Poder relativo de neutralização total

PROHAB	Progresso e Habitação de São Carlos S. A.
RCD	Resíduo de construção e demolição
RCD-R	Resíduo de construção e demolição reciclado
RE	Reatividade
ROI	Região de interesse
S	Soma de bases
SARC	Secretaria de Apoio Rural e Cooperativismo
SDA	Secretaria de Defesa Agropecuária
TSFM	Torrão separado pela frente de molhamento
V%	Saturação por bases
VF	Vermelho fino
VG	Vermelho grosso
VOI	Volume de interesse

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos Gerais .....	19
1.2 Objetivos Específicos .....	19
1.3 Hipóteses.....	19
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1 Acidez do solo e corretivos.....	20
2.1.1 Poder de Neutralização (PN) .....	24
2.1.2 Reatividade (RE) e Efeito Residual .....	25
2.1.3 Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) .....	27
2.2 Capacidade de retenção de água e condicionadores de solos .....	28
2.2.1 Capacidade de retenção da água no solo .....	29
2.2.2 Água armazenada no solo .....	34
2.2.3 Condicionadores de solos.....	36
2.3 Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) .....	37
2.3.1 Definição, classificação e questão ambiental .....	37
2.3.2 Reciclagem do RCD .....	39
2.3.3 RCD-R cinza .....	42
2.3.4 RCD-R vermelho.....	43
2.3.5 Contaminantes potencialmente perigosos.....	46
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	48
3.1 Experimentos preliminares .....	50
3.1.1 Curvas de umidade.....	50
3.1.2 Análise química dos resíduos reciclados.....	50
3.2 Caracterização e análise da variabilidade do RCD-R.....	51
3.2.1 Espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX).....	51
3.2.2 Difractometria de Raios X (DRX).....	53
3.2.3 Medidas dos teores de CaO e MgO, PN e PRNT.....	54

3.3	Experimento com cultura de alfafa ( <i>Medicago sativa</i> cv. Crioula) .....	54
3.3.1	Caracterização de CF, CG, VF e VG .....	56
3.3.2	Experimento com RCD-R cinza (concreto) .....	56
3.3.3	Experimento com RCD-R vermelho (chamote) .....	59
3.3.4	Análise granulométrica por radiação gama .....	62
3.3.5	Microtomografia computadorizada de raios X (Micro TC) .....	63
3.4	Curvas de neutralização da acidez do solo com CF e CG .....	66
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	68
4.1	Experimentos preliminares .....	68
4.1.1	Curvas de umidade .....	68
4.1.2	Análise química preliminar dos resíduos reciclados .....	70
4.2	Caracterização e análise da variabilidade do RCD-R .....	71
4.2.1	Espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX) .....	71
4.2.2	Difratometria de Raios X (DRX) .....	73
4.2.3	Medidas dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT .....	75
4.3	Experimento com cultura de alfafa ( <i>Medicago sativa</i> cv. Crioula) .....	76
4.3.1	Caracterização das frações CF, CG, VF e VG .....	76
4.3.2	Análise granulométrica por radiação gama .....	78
4.3.3	Análise química de fertilidade do solo .....	84
4.3.4	Curvas características de retenção de água (CR) .....	87
4.3.5	Microtomografia computadorizada de raios X (Micro TC) .....	95
4.3.6	Produção de matéria seca da alfafa (MS) .....	101
4.4	Curvas de neutralização da acidez do solo com CF e CG .....	108
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	115
	REFERÊNCIAS .....	117

## 1 INTRODUÇÃO

Solos arenosos são encontrados em quase todo o território nacional brasileiro e apresentam algumas características desfavoráveis como baixa capacidade de retenção de água, grandes perdas de água e fertilizantes por percolação, baixa fertilidade e alto potencial erosivo que proporcionam, em geral, baixas produtividades agrícolas dessas áreas (SIVAPALAN, 2006), principalmente em regiões com ocorrência de chuvas irregulares ou sem acesso ao manejo de irrigação (PRADO, 1998). Por outro lado, esses solos possuem algumas qualidades favoráveis como a facilidade de manejo com máquinas e implementos e a menor susceptibilidade à compactação (DIAS-JÚNIOR, 2000). Assim, a utilização de práticas que propiciem a melhoria das condições físicas e químicas desses solos como a incorporação de materiais condicionadores, pode deixá-los com características mais adequadas para o cultivo de culturas anuais e perenes.

A utilização de materiais condicionadores para a melhoria das características físicas de solos arenosos é uma prática comum e já tem sido estudada há vários anos por inúmeros pesquisadores, apresentando-se como um tema já bem estabelecido na literatura (SIVAPALAN, 2006; AKHTER et al., 2004; EL-SAIED et al., 2004; SHULGA et al., 2001; SEN et al., 2005; CHOUDHARY et al., 1995).

Solos ácidos também são muito comuns no território brasileiro, demandando a utilização de materiais corretivos de acidez. A acidez do solo é um dos principais fatores capazes de reduzir o potencial produtivo dos solos tropicais e grande parte dos solos de cerrado que apresentam pH-H<sub>2</sub>O baixo (< 5,5), alta concentração de Al<sup>3+</sup> e baixos teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, abrangendo a camada superficial (0–20 cm) e subsuperficial (> 20 cm) (RAMOS et al., 2006). Segundo Lopes et al. (2002), a acidez dos solos promove o aparecimento de elementos tóxicos para as plantas (Al) além de causar a diminuição da disponibilidade de nutrientes para as mesmas. As consequências são os prejuízos causados pelo baixo rendimento produtivo das culturas. Portanto, a correção da acidez do solo (calagem) é considerada como uma das práticas que mais contribui para o aumento da eficiência dos adubos e, conseqüentemente, da produtividade e da rentabilidade agropecuária (LOPES et al., 1991).

Os principais materiais empregados como corretivos da acidez do solo são: cal virgem, cal hidratada ou extinta, calcário calcinado, silicatos (escória de siderurgia), calcários marinhos (corais Sambaquis) e o calcário (rocha calcária), sendo, este último, o mais utilizado (LOPES et al., 2002). A maior parte desses materiais é derivada de depósitos naturais de carbonato de cálcio e magnésio e produzida via mineração da rocha calcária o que causa vários impactos ambientais inerentes à atividade de mineração.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo da viabilidade da utilização de resíduos de construção civil e de demolição reciclados (RCD-R) como corretivos de acidez e também como condicionadores de solos. Como esse material é constituído basicamente de areia, cimento, cal e argila (cerâmica), dentre outros, tem similaridade com o solo e possui, em princípio, possibilidade de disposição e incorporação no solo sem danos ou alterações significativas na sua função.

Estudos preliminares mostraram que estes materiais possuem alta capacidade de absorver água, pH próximo de 10 e são boas fontes de cálcio e magnésio. Estes dados são fortes indicativos de que, incorporados ao solo na forma de agregados, esses materiais podem ajudar a aumentar a capacidade de retenção de água e reduzir a acidez do solo.

Além disso, a possibilidade do uso de RCD-R na agricultura, como uma alternativa viável para o produtor rural, pode vir a criar um novo mercado para a indústria de reciclagem de RCD, além de contribuir para uma destinação final ambientalmente correta desses resíduos que representam mais de 50% em massa dos resíduos sólidos gerados nos médios e grandes centros urbanos brasileiros. Isto está em perfeito alinhamento com a Lei 12.305/2010, sancionada em 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) da qual uma das principais diretrizes é o “incentivo ao uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados” (BRASIL, 2010).

## **1.1 Objetivos Gerais**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade da utilização de RCD-R como material condicionador e corretivo de acidez para a melhoria da qualidade física e química de solos arenosos e/ou ácidos, contribuindo para uma destinação ambientalmente correta desses resíduos.

## **1.2 Objetivos Específicos**

1. Caracterizar química e mineralogicamente o RCD-R produzido pela Usina de Reciclagem de resíduos de construção e demolição da PROHAB no município de São Carlos – SP, por meio de medidas do poder de neutralização (PN), poder relativo de neutralização total (PRNT) e dos teores de CaO e MgO e análises por fluorescência de raios X e difração de raios X, com amostragens periódicas ao longo de 12 meses;
2. Avaliar o desempenho em casa de vegetação desse RCD-R, como material condicionador e corretivo da acidez de solos, considerando a melhoria da capacidade de retenção de água, a correção do pH do solo e o aumento da produtividade em cultura de alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula);
3. Avaliar a macro e a microporosidade do solo com a aplicação desses materiais por meio da microtomografia de raios X e obter as curvas características de retenção de água no solo por meio da técnica da câmara de pressão de Richards.

## **1.3 Hipóteses**

- a) A incorporação de resíduos da construção civil e de demolição reciclados (RCD-R) a solos arenosos e/ou ácidos pode melhorar suas condições físicas e químicas por meio do aumento da capacidade de retenção de água e correção do pH desses solos, melhorando suas características para fins agrícolas;
- b) O aproveitamento de resíduos da construção civil reciclados (RCD-R) como condicionadores e corretivos de solos pode ser uma alternativa técnica e economicamente viável, além de contribuir para uma destinação ambientalmente correta desses resíduos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Acidez do solo e corretivos

A acidez do solo é um dos principais fatores capazes de reduzir o potencial produtivo dos solos brasileiros, pois promove a liberação de elementos tóxicos para as plantas ( $\text{Al}^{3+}$ ) e diminui a disponibilidade de nutrientes para as mesmas (LOPES et al., 1991). Lopes e Guilherme (2000) afirmam que adubar uma cultura em solo ácido é desperdiçar fertilizantes porque o pH baixo do solo dificulta a assimilação dos nutrientes pelas plantas, sendo este um dos pontos mais importantes relacionados à baixa eficiência das adubações, baixas produtividades e baixos lucros dos agricultores, em um grande número de culturas no Brasil.

Segundo Ramos et al. (2006), grande parte dos solos de cerrado apresenta pH-H<sub>2</sub>O baixo (< 5,5), alta concentração de  $\text{Al}^{3+}$  e baixos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , abrangendo a camada superficial (0–20 cm) e subsuperficial (> 20 cm). As consequências são os prejuízos causados pelo baixo rendimento produtivo das culturas. Portanto, a correção da acidez do solo (calagem) é uma das práticas que mais contribui para o aumento da eficiência dos adubos e, conseqüentemente, da produtividade e da rentabilidade agropecuária (LOPES et al., 1991).

Segundo Alcarde e Rodella (2003), a acidez de um solo é resultado da presença de íons  $\text{H}^+$  livres geralmente associados a componentes ácidos presentes, como ácidos orgânicos, fertilizantes nitrogenados, etc. A calagem ou neutralização da acidez do solo consiste em neutralizar o próton por meio do ânion  $\text{OH}^-$ , segundo a reação abaixo:



Assim, os corretivos de acidez devem ser materiais básicos que possam disponibilizar  $\text{OH}^-$ , promovendo a neutralização (ALCARDE, 2005). O mesmo autor também afirma que corretivos de acidez do solo são produtos que, além de serem capazes de neutralizar ou reduzir a acidez, devem ainda carrear nutrientes vegetais ao solo, principalmente cálcio e magnésio.

Em geral, a calagem deve elevar o pH do solo a níveis entre 6 e 7. Nesta faixa de pH não ocorre a toxidez do alumínio e manganês para as plantas, a disponibilidade dos nutrientes minerais é mais equilibrada e a atividade dos microorganismos que dão vida ao solo é maior (MELLO FILHO, 2005).

Segundo Lopes e Guilherme (2000), o pH do solo não afeta apenas a disponibilidade dos nutrientes nele contidos ou adicionados pela adubação e correção, mas regula também a assimilação desses nutrientes pelas plantas. A Tabela 1 apresenta uma estimativa da variação percentual na assimilação dos principais nutrientes pelas plantas, em função do pH do solo. É notável que a correção do pH do solo de 4,5 para 7,0 provoca um aumento da ordem de 300% na assimilação média dos nutrientes listados. Esta é uma das melhores justificativas para se fazer a correção de acidez do solo quando se pretende fazer uso de fertilizantes (LOPES; GUILHERME, 2000).

Tabela 1 - Estimativa de variação percentual na assimilação dos principais nutrientes pelas plantas, em função do pH do solo

Elementos	pH					
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
<b>Nitrogênio</b>	20	50	75	100	100	100
<b>Fósforo</b>	30	32	40	50	100	100
<b>Potássio</b>	30	35	70	90	100	100
<b>Enxofre</b>	40	80	100	100	100	100
<b>Cálcio</b>	20	40	50	67	83	100
<b>Magnésio</b>	20	40	50	70	80	100
<b>Médias</b>	<b>26,7</b>	<b>46,2</b>	<b>64,2</b>	<b>79,5</b>	<b>93,8</b>	<b>100</b>

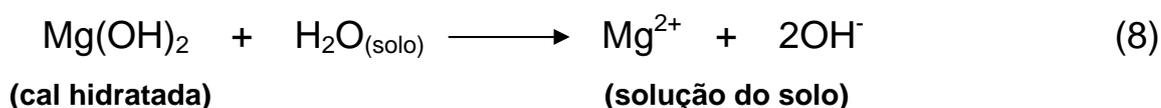
Fonte: EMBRAPA (1980)

Os principais materiais empregados como corretivos da acidez do solo são: cal virgem, cal hidratada ou extinta, calcário calcinado, silicatos (escória de siderurgia), calcários marinhos (corais Sambaquis) e o calcário (rocha calcária) sendo, este último, o mais utilizado (LOPES et al., 2002). Alcarde e Rodella (2003) reafirmam que o material mais utilizado como corretivo de acidez do solo é o calcário que é obtido pela moagem da rocha calcária, cujos principais constituintes são o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e o carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ). Dependendo do teor de  $\text{MgCO}_3$ , os calcários são classificados como: calcítico quando o teor de



A cal hidratada, também largamente utilizada na construção civil, é obtida a partir da calcinação e moagem da rocha calcária magnesiana ou dolomítica e posterior hidratação, secagem e pulverização. O produto final é composto basicamente de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (MELLO FILHO, 2005).

A neutralização da acidez proporcionada pela cal hidratada é regida pelas seguintes reações:



Essas reações mostram que, no solo, a cal hidratada libera  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$ . Como a liberação de  $\text{OH}^-$  é imediata e total, esta cal tem o caráter de base forte; e o  $\text{OH}^-$  produzido neutralizará o  $\text{H}^+$  da solução do solo, responsável por sua acidez (ALCARDE; RODELLA, 2003).

Segundo Alcarde e Rodella (2003), uma base é considerada forte ou fraca pela intensidade com que coloca, de imediato, todos os seus  $\text{OH}^-$  no meio. Uma base forte coloca de imediato todos os seus  $\text{OH}^-$  no meio, enquanto uma base fraca, devido ao equilíbrio químico, faz isto de forma mais lenta e em pequenas quantidades.

No processo de neutralização do solo, o cálcio e o magnésio não participam como neutralizantes e, sim, como nutrientes vegetais. As bases químicas efetivas, que agem como neutralizadoras do pH, são  $\text{CO}_3^{2-}$  (no caso dos calcários),  $\text{OH}^-$  (no caso da cal hidratada) e  $\text{SiO}_3^{2-}$  (no caso de escórias siderúrgicas). Isso significa que, em princípio, quaisquer carbonatos, hidróxidos ou silicatos solúveis como  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{LiOH}$  e  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , corrigem a acidez, porém não são considerados corretivos de acidez “do solo”. Devido à existência, em abundância, de materiais que associam essas bases químicas aos nutrientes Ca e Mg, estes são os indicados para corrigir a acidez “dos solos”, ou seja, são os considerados corretivos de acidez “dos solos” (ALCARDE, 2005).

A qualidade de um corretivo de solo depende, principalmente, do teor e da natureza química dos compostos neutralizantes presentes e da velocidade com que o corretivo reage e neutraliza a acidez dos solos. De acordo com esta natureza química, os constituintes podem gerar bases fracas, como carbonatos e silicatos, de ação mais lenta, ou bases fortes como os hidróxidos de ação mais rápida e energética (ALCARDE; RODELLA, 2003).

Os principais compostos químicos neutralizantes da acidez presentes nos corretivos são: carbonatos de cálcio e magnésio ( $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ ) nos calcários, óxidos de cálcio e magnésio ( $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ ) na cal virgem, hidróxidos de cálcio e magnésio ( $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ ) na cal hidratada e silicatos de cálcio e magnésio ( $\text{CaSiO}_3$  e  $\text{MgSiO}_3$ ) nas escórias siderúrgicas.

A seguir, são apresentados os principais atributos de qualidade que caracterizam um material como corretivo da acidez do solo:

### 2.1.1 Poder de Neutralização (PN)

O poder de neutralização indica a capacidade potencial do corretivo em neutralizar a acidez do solo (ALCARDE, 2005). O poder de neutralização (PN) de um corretivo depende do teor de neutralizantes presentes e da sua natureza química. Cada espécie neutralizante possui uma determinada capacidade de neutralização, conforme mostrado na Tabela 2, onde as capacidades são expressas em relação à capacidade do  $\text{CaCO}_3$ , tomada como padrão.

Tabela 2 - Capacidade de neutralização de diferentes espécies neutralizantes, em relação ao  $\text{CaCO}_3$

<b>Espécies Neutralizantes</b>	<b>Capacidade de neutralização relativa ao <math>\text{CaCO}_3</math></b>
$\text{CaCO}_3$	1,00
$\text{MgCO}_3$	1,19
$\text{CaO}$	1,79
$\text{MgO}$	2,48
$\text{Ca(OH)}_2$	1,35
$\text{Mg(OH)}_2$	1,72
$\text{CaSiO}_3$	0,86
$\text{MgSiO}_3$	1,00

Fonte: Alcarde (2005)

A determinação do PN indica apenas que o produto é alcalino (básico). A partir daí supõe-se que seu constituinte seja o carbonato de cálcio, não possibilitando caracterizar a natureza química do neutralizante, isto é, se é carbonato, óxido, hidróxido ou silicato. Assim, o poder de neutralização expresso em porcentagem de “equivalente carbonato de cálcio” indica o teor de neutralizantes, em geral, contido no produto. A determinação do PN também não possibilita caracterizar se este é corretivo de acidez “do solo”, ou seja, se as bases estão associadas ao Ca ou ao Mg. (ALCARDE; RODELLA, 2003).

Segundo Alcarde (2005, p. 12), “A identificação de um produto como corretivo de acidez dos solos é feita determinando-se os teores de cálcio e de magnésio. A ausência ou teores muito baixos desses elementos indicam que o produto não é corretivo de acidez do solo.” Esta determinação fornece os teores de Ca e Mg de forma elementar, mas, por convenção, são expressos como CaO e MgO em todos os corretivos.

Segundo Mello Filho (2005), o valor do PN pode ser determinado analiticamente em laboratório ou, em uma aproximação, pode ser calculado nos casos em que a totalidade do cálcio e do magnésio esteja na forma de óxidos, hidróxidos ou carbonatos. O cálculo é feito por:

$$\text{PN} = \text{CaO}\% \times 1,79 + \text{MgO}\% \times 2,48 \quad (10)$$

Onde:

- CaO é o percentual de óxido de cálcio presente;
- MgO é o percentual de óxido de magnésio presente;
- 1,79 é a capacidade de neutralização do CaO em relação ao  $\text{CaCO}_3$ ;
- 2,48 é a capacidade de neutralização do MgO em relação ao  $\text{CaCO}_3$ .

### **2.1.2 Reatividade (RE) e Efeito Residual**

A reatividade (RE) de um corretivo expressa a velocidade de sua ação no solo, ou seja, a rapidez com que corrige a acidez. A reatividade depende das condições do solo e do clima (pH, temperatura e umidade), da natureza química das

bases (fortes ou fracas) e da granulometria do corretivo (quanto mais fino, mais reativo) (ALCARDE, 2005).

A Tabela 3 apresenta as taxas de reatividade para diferentes frações granulométricas dos calcários. Esta taxa representa o percentual de ação do calcário no solo num período de três meses logo após a aplicação.

Tabela 3 - Taxas de reatividade das partículas de diferentes tamanhos dos calcários, adotados pela legislação brasileira

<b>Fração granulométrica</b>	<b>Fração granulométrica</b>	<b>Reatividade (RE)</b>
<b>Peneira (ABNT)</b>	<b>Dimensão (mm)</b>	<b>%</b>
maior que 10	maior que 2	0
10 – 20	2 a 0,84	20
20 – 50	0,84 a 0,30	60
menor que 50	menor que 0,30	100

Fonte: Alcarde (2005)

De acordo com a Tabela 3, a fração granulométrica maior que 2mm (peneira 10) não tem efeito considerável na correção da acidez nos primeiros três meses; 80% da fração 10 -20 (2 a 0,84mm) e 40% da fração 20 - 50 (0,84 a 0,30mm) continuarão agindo no solo após o período de três meses; e a fração menor que 50 (menor que 0,30mm) reage totalmente em três meses.

Assim, a partir da granulometria, a reatividade (RE) de um corretivo pode ser calculada por:

$$RE(\%) = F_{10-20} \times 0,2 + F_{20-50} \times 0,6 + F_{<50} \times 1,0 \quad (11)$$

Onde:

- $F_{10-20}$  é o percentual da fração 10 – 20;
- $F_{20-50}$  é o percentual da fração 20 – 50;
- $F_{<50}$  é o percentual da fração <50.

Portanto, a reatividade significa o percentual de um corretivo que reage no solo dentro de um período de três meses. A diferença (100 – RE) é o percentual de ação mais lenta que exercerá sua ação após os três meses iniciais (ALCARDE, 2005).

O mesmo autor define o efeito residual de um corretivo como o tempo de duração da correção da acidez, ou seja, a duração da calagem. O efeito residual depende de vários fatores como a dosagem de corretivo utilizado, tipo de solo, adubações realizadas, entre outros. Alcarde (2005, p. 16) ressalta que existe um antagonismo entre o efeito residual e a reatividade: “[...] quanto mais rápida a ação do corretivo, menor é a duração da calagem e vice-versa.”

### 2.1.3 Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT)

A ação de um corretivo depende, fundamentalmente, do seu poder de neutralização (PN) e da sua reatividade (RE). Isolados, estes parâmetros não permitem uma adequada avaliação do corretivo, por isso, foram associados, dando origem ao índice denominado Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) (ALCARDE, 2005), que é dado pela expressão:

$$\text{PRNT} = \text{PN} \times \text{RE} / 100 \quad (12)$$

No caso, por exemplo, de um calcário com  $\text{PN} = 95\%E_{\text{CACO}_3}$  e  $\text{RE} = 80\%$ , o valor do PRNT será:  $\text{PRNT} = 95 \times 80 / 100 = 76\%$ . Lembrando que a reatividade é o percentual da ação do corretivo que será exercida nos primeiros três meses, este PRNT significa que 80% (RE) de seu potencial de neutralização ( $\text{PN}=95\%$ ) será exercido em três meses. Isto significa que 80% do PN, isto é,  $76\%E_{\text{CACO}_3}$  agirá nos primeiros três meses e o restante ( $95-76 = 19E_{\text{CACO}_3}$ ) agirá posteriormente.

Em Brasil (2004), a Instrução Normativa SARC nº 4 estabelece as especificações e garantias mínimas dos produtos a serem comercializados como corretivos de solos. Quanto às características físicas, o artigo 2º desta Instrução Normativa estabelece que:

Os corretivos de acidez, alcalinidade e sodicidade terão a natureza física sólida, apresentando-se em pó, caracterizado como produto constituído de partículas que deverão passar 100% (cem por cento) em peneira de 2 (dois) milímetros (ABNT nº 10), no mínimo 70% (setenta por cento) em peneira de 0,84 (zero vírgula oitenta e quatro) milímetros (ABNT nº 20) e no mínimo 50% (cinquenta por cento) em peneira de 0,3 (zero vírgula três) milímetros (ABNT nº 50).

Além das características físicas mínimas acima, esta Instrução Normativa estabelece as especificações e garantias mínimas apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores mínimos de PN, %CaO + %MgO e PRNT exigidos pela legislação brasileira para registro e comercialização de corretivos de pH do solo

<b>Material corretivo de acidez</b>	<b>PN (% E <math>\text{CaCO}_3</math>) Mínimo</b>	<b>SOMA %CaO + %MgO Mínimo</b>	<b>PRNT Mínimo</b>
Calcário agrícola	67	38	45
Calcário calcinado agrícola	80	43	54
Cal hidratada agrícola	94	50	90
Cal virgem agrícola	125	68	120
Outros (gesso, escória siderúrgica, etc.)	67	38	45

Fonte: Brasil (2004)

## 2.2 Capacidade de retenção de água e condicionadores de solos

A água é essencial a todas as formas de vida do planeta, mas, de modo especial, a água retida no solo é fundamental para as plantas que a utilizam como veículo para carrear, do solo, os nutrientes de que precisam. As plantas têm, portanto, a capacidade de absorver esta água liberando-a, posteriormente, para a atmosfera pela transpiração (REICHARDT; TIMM, 2004).

### 2.2.1 Capacidade de retenção da água no solo

A água pode ser retida no solo por dois tipos de fenômenos ou processos: a capilaridade e a adsorção.

A capilaridade deve-se à afinidade entre as partículas sólidas e a água observada na interface com a atmosfera. A capilaridade se manifesta em solos razoavelmente úmidos, ou seja, com umidade acima de um determinado valor. À medida que o solo perde água, os poros vão sendo drenados e suas partículas sólidas permanecem recobertas apenas por finas películas de água. Nesta transição de uma condição úmida para outra mais seca, o fenômeno da capilaridade vai perdendo expressão e dando lugar ao fenômeno da adsorção, no que tange à retenção de água (AMARO FILHO et al., 2008).

Existem, portanto, forças que atuam na matriz do solo para que haja retenção de água e estas podem ser forças capilares ou de adsorção. Ambas são denominadas forças mátricas e contribuem para o potencial mátrico do solo.

A capacidade de retenção de água de um solo é bastante dependente do seu sistema de poros. A porosidade total ( $\alpha$ ) de um solo pode ser definida como a razão entre o volume total de vazios ( $V_p$ ), que pode ser ocupado pelo ar ou pela água, e o volume total do solo ( $V$ ), dado por:

$$\alpha = V_p / V = (V_{ar} + V_{água}) / V \quad (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) \quad (13)$$

ou ainda

$$\alpha = (V - V_s) / V = 1 - (V_s / V) \quad (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}) \quad (14)$$

Onde:  $V_s$  é o volume total de sólidos do solo.

Percentualmente, a porosidade pode ser dada por:

$$\alpha\% = 100 \cdot \alpha \quad (15)$$

Outra forma de calcular a porosidade do solo é a partir da relação entre a densidade do solo e a densidade das partículas.

A densidade do solo ( $\rho_s$ ), também conhecida como densidade global ou aparente, é dada por:

$$\rho_s = m_s / V \quad (\text{g.cm}^{-3} \text{ ou } \text{kg.m}^{-3}) \quad (16)$$

Onde:  $m_s$  é a massa total de sólidos do solo.

A densidade das partículas ( $\rho_p$ ), também conhecida como densidade real ou densidade dos sólidos, é definida como a relação entre a massa total e o volume total dos sólidos, dada por:

$$\rho_p = m_s / V_s \quad (\text{g.cm}^{-3} \text{ ou } \text{kg.m}^{-3}) \quad (17)$$

Assim, substituindo as Equações 16 e 17 na Equação 14, obtém-se que:

$$\alpha = 1 - (V_s / V) = 1 - (m_s / \rho_p) / (m_s / \rho_s) = 1 - (\rho_s / \rho_p) \quad (18)$$

A Equação 18 evidencia a relação existente entre a densidade e a porosidade do solo. Por exemplo, considerando um solo com densidade de partículas  $\rho_p = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$  (do quartzo), a Tabela 5 mostra os valores de porosidade do solo em função da densidade global na faixa de 1,0 a 1,6  $\text{g.cm}^{-3}$ .

Em geral, a porosidade total do solo varia na faixa de 30% a 60% aproximadamente, dependendo do tipo de solo, textura e constituintes do mesmo. É comum encontrar-se porosidade total em torno de 35% a 50% nos horizontes superficiais de solos arenosos e 40% a 60% em solos argilosos (AMARO FILHO et al., 2008).

A geometria do espaço poroso pode ser muito complexa com poros de diversos tamanhos e formatos, podendo estes ser muito ou pouco interconectados. Do ponto de vista prático, é mais importante conhecer a distribuição dos diferentes tamanhos de poros do que seu volume total, pois o tamanho do poro determina a sua função nas relações solo-planta-atmosfera. Uma distribuição que tenha muitos

poros de pequeno tamanho favorecerá a retenção de água e fará com que os movimentos de água e ar sejam muito lentos. Por outro lado, uma distribuição que concentre muitos poros grandes possibilitará uma boa distribuição de gases e altas velocidades de infiltração de água, mas induzirá uma baixa capacidade de retenção de água.

Tabela 5 - Relação entre densidade global e porosidade de um solo com  $\rho_p = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$

Densidade global do solo ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	Porosidade (%)
1,0	62
1,1	58
1,2	55
1,3	51
1,4	47
1,5	43
1,6	40

Segundo Amaro Filho et al. (2008), em 1860, Schumaker propôs uma divisão simples da porosidade do solo entre o que ele chamou de porosidade capilar (atualmente microporosidade) e porosidade não capilar (atualmente macroporosidade). Com isso, estabeleceu empiricamente uma classificação dos poros do solo em dois grupos: macroporos (poros com diâmetro =  $50 \mu\text{m}$ ) e microporos (poros com diâmetro  $< 50 \mu\text{m}$ ).

Outra classificação sugerida por Libardi (2005) propõe três grupos de poros:

- a) Macroporos: poros com diâmetro  $> 100 \mu\text{m}$ , cuja principal função é a aeração da matriz do solo e condução da água durante o processo de infiltração;
- b) Mesoporos: poros com diâmetro entre  $30$  e  $100 \mu\text{m}$ , cuja principal função é a condução de água durante o processo de redistribuição da mesma no solo, ou seja, após a infiltração, quando se esvaziam os macroporos;

- c) Microporos: poros com diâmetro inferior a 30  $\mu\text{m}$ . São poros que possuem alta capacidade de retenção de água, atuando portanto, no armazenamento da água no solo.

Do ponto de vista agrônômico, o volume de microporos corresponde à quantidade máxima de água que o solo pode reter contra o potencial gravitacional. No caso de irrigação, por exemplo, este será o volume máximo de água que deve ser adicionado ao solo. O que exceder o volume de microporos será perdido por força gravitacional. Já os macroporos são os responsáveis pela difusão e trocas gasosas no solo (AMARO FILHO et al., 2008).

Geralmente, em solos arenosos, ocorre a predominância de macroporos o que possibilita bastante espaço de aeração em detrimento do armazenamento de água. Por outro lado, em solos argilosos há o predomínio de microporos o que favorece a capacidade de retenção de água, mas pode induzir problemas de aeração.

Existe uma relação entre o diâmetro equivalente do poro e a tensão com que este consegue reter água, dada pela equação da capilaridade abaixo:

$$d = 4 \sigma \cos\alpha / \rho g h \quad (19)$$

Onde:

$d$  = diâmetro equivalente do poro (unidade: cm)

$\sigma$  = tensão superficial da água (71,97 erg.cm<sup>-2</sup> à 25 °C)

$\alpha$  = ângulo de contato água/sólido (graus)

$\rho$  = densidade da água (1 g.cm<sup>-3</sup>)

$g$  = aceleração da gravidade da Terra (981 cm.s<sup>-2</sup>)

$h$  = tensão com que a água é retida (cm de coluna de água – 0,1 kPa)

Para água a 25 °C e ângulo de contato igual a zero (o que é razoável para a condição de não saturação), a Equação 19 pode ser reduzida a:

$$d = 0,3 / h \quad (20)$$

O somatório das contribuições das tensões de todos os poros de um determinado volume de solo, com seus diversos diâmetros equivalentes, resultará no potencial mátrico ( $\Psi_m$ ) deste solo que, em última análise, é o que define a sua capacidade de retenção de água (CRA).

A quantidade de água retida no solo pode ser expressa em termos da umidade deste solo. A umidade geralmente é expressa em porcentagem a base de massa ( $u$ ) ou a base de volume ( $\theta$ ).

$$u (\%) = 100 \cdot (\text{massa de água}) / (\text{massa de solo seco}) \quad (21)$$

$$\theta (\%) = 100 \cdot (\text{volume de água}) / (\text{volume de solo seco}) \quad (22)$$

Uma vez que a densidade da água é igual a  $1 \text{ g.cm}^{-3}$ , vale a seguinte relação:

$$\theta (\%) = u (\%) \cdot \rho_s \quad (23)$$

O potencial mátrico da água no solo ( $\Psi_m$ ) expressa o estado de energia da água no solo devido à interação desta com o conjunto de partículas sólidas, chamada de matriz do solo. Os fenômenos envolvidos nesta interação são a capilaridade e a adsorção que colocam a água, que está na matriz do solo, em níveis energéticos inferiores ao da água livre, à pressão atmosférica (considerado como padrão – potencial igual a zero). Assim, o potencial mátrico da água no solo representa a contribuição das forças responsáveis pela retenção da água no solo e sempre será negativo (AMARO FILHO et al., 2008).

O potencial mátrico da água no solo ( $\Psi_m$ ) depende da umidade. Na situação em que o solo está saturado este potencial é igual a zero, mas, à medida que vai secando, o potencial mátrico vai-se tornando cada vez menor (cada vez mais negativo), isto é, à medida que o solo seca, fica cada vez mais difícil retirar água dele. Portanto, a relação entre potencial mátrico e umidade é uma característica física do solo que costuma ser expressa por meio da curva de retenção de água.

### 2.2.2 Água armazenada no solo

A quantidade de água armazenada no solo é função de sua umidade. Uma forma interessante de expressar esta água armazenada é em termos da altura de água em milímetros. Esta altura é definida pela lâmina de um determinado volume de água por unidade de área. Quando, por exemplo, um litro de água é derramado sobre uma área de  $1\text{m}^2$  plana, a altura de água obtida é de 1 mm.

Consideremos  $Z$  a profundidade de interesse do solo que, em geral, corresponde à profundidade efetiva do sistema radicular da cultura em estudo. Consideremos ainda que toda a água do volume de solo  $V = XYZ$ , da Figura 1, fosse colocada sobre a superfície do solo. Assim, o volume de água retirado será  $V_a = XYh$ , onde  $h$  é altura da água e  $XY$  a área da superfície de solo considerada.

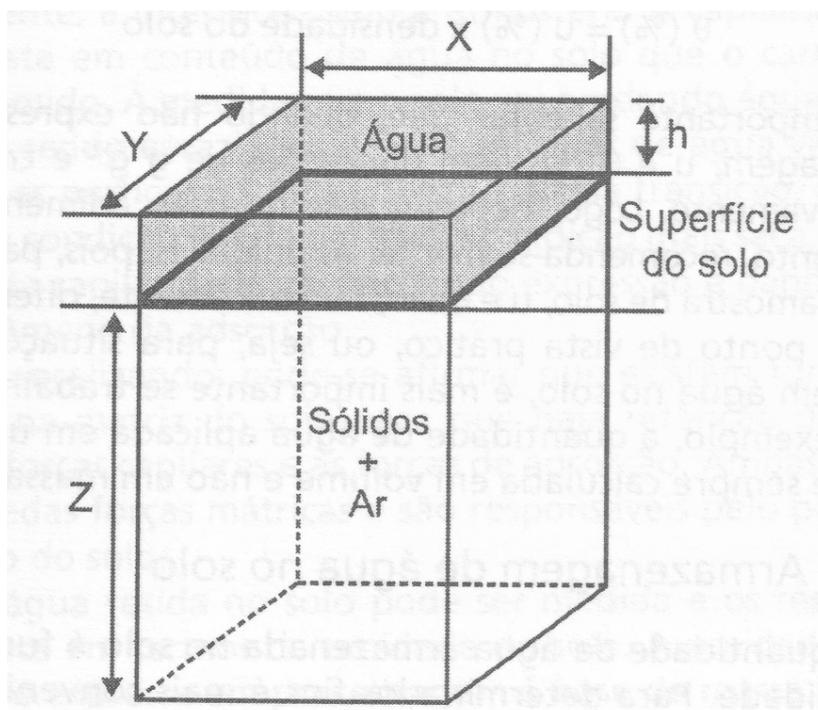


Figura 1 - Separação da fração líquida de um volume de solo XYZ  
Fonte: Adaptada de Libardi (2005)

Com base na definição de umidade volumétrica (Equação 22), podemos escrever que

$$\theta = XYh / XYZ = h / Z \quad (24)$$

Dessa forma, a altura de água armazenada no perfil de profundidade Z pode ser expressa como função da umidade, por

$$A_{arm} = h = \theta \cdot Z \quad (\text{mm}) \quad (25)$$

Em geral, a umidade é função da profundidade, ou seja,  $\theta$  é um  $\theta(z)$ . Assim, uma forma mais precisa para expressar a água armazenada em uma determinada camada L do solo é

$$A_{arm} = \int_0^L \theta(z) dz \quad (\text{mm}) \quad (26)$$

Entretanto, na prática, nem sempre a função  $\theta(z)$  é conhecida. Neste caso, é comum utilizar-se o valor médio da umidade no intervalo 0 – L para cálculo da água armazenada.

$$A_{arm} = \bar{\theta} \cdot Z \quad (\text{mm}) \quad (27)$$

Um índice de qualidade físico-hídrica do solo bastante utilizado é a capacidade de água disponível (CAD) que é definido como a água que o solo consegue armazenar entre os seguintes estados de umidade: capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) (BERNARDI et al., 2009). Assim, a CAD de um solo pode ser expressa por

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \cdot L \quad (\text{mm}) \quad (28)$$

### 2.2.3 Condicionadores de solos

Peixoto et al. (1998, p. 409), na Enciclopédia Agrícola Brasileira editada pela Edusp, traz a seguinte definição para condicionadores de solos:

Expressão utilizada para denominar corretivos de solo que visam a melhoria das propriedades físicas, principalmente de retenção de água. Assim como os corretivos agrícolas ou fertilizantes melhoram as propriedades químicas do solo (fertilidade), os condicionadores de solo modificam as qualidades físicas do solo (retenção de água). É muito difícil aumentar a capacidade de retenção de água de um solo, e a procura de materiais adequados para este fim vem de longe. A matéria orgânica possui esta propriedade e, por isso, poderia ser considerada um condicionador de solo, mas, tradicionalmente, a expressão é reservada para materiais organominerais, como, por exemplo, as emulsões de betume, os géis de poliacrilamida e a vermiculita expandida. Em regiões áridas e semi-áridas e, no caso de culturas intensivas de alto retorno, os condicionadores de solo têm-se mostrado eficientes.

De acordo com Bernardi et al. (2009, p. 124),

O uso de condicionadores de solo é uma alternativa para aumentar a capacidade de retenção de água e nutrientes dos solos arenosos. O conceito de condicionadores envolve a aplicação de materiais aos solos para modificar favoravelmente propriedades físicas adversas, tais como a baixa capacidade de retenção de água.

Os condicionadores de solo podem ter natureza bastante variável e englobar desde material natural orgânico e inorgânico até produtos sintéticos industrializados.

A Secretaria de Apoio Rural e Cooperativismo (SARC), em sua Instrução Normativa N° 4, de 2 de agosto de 2004, que aprova as definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos condicionadores de solo, estabelece que estes podem ser produtos destinados à melhoria das propriedades físicas ou físicoquímicas do solo ou, ainda, produtos destinados à melhoria da atividade biológica do solo. No caso de produtos para a melhoria das propriedades físicas ou físicoquímicas, prevê que devem atender às seguintes especificações mínimas: capacidade de retenção de água (CRA) a uma tensão de 10cm de coluna de água (1kPa) = 60% e capacidade de troca de cátions (CTC) = 200 mmolc/dm<sup>3</sup> (BRASIL, 2004).

Além do aumento da capacidade de retenção de água e da capacidade de troca de cátions, outros efeitos que também podem ser esperados dos condicionadores de solo são: o aumento da estabilidade dos agregados e a redução do potencial erosivo (AMARO FILHO et al., 2008).

Na literatura, é possível encontrar diversos materiais que têm sido utilizados como condicionadores para a melhoria das propriedades físicas ou físicoquímicas do solo por produtores rurais ou, ainda, em nível de pesquisa. Como exemplos de materiais, podem ser citados a poliacrilamida (SIVAPALAN, 2006; LENTZ, 2003; BRANDSMA et al., 1999; LENTZ; SOJKA, 1994), hidrogéis (AOUADA et al., 2005; MOURA et al., 2005; WEI et al., 2005; MIKKELSEN et al., 1995), zeólitas (BERNARDI et al., 2005; BERNARDI; MONTE, 2004; MING; MUMPTON, 1989; ALLEN et al., 1995); xisto betuminoso (FREDE et al., 1994), resíduos industriais como da indústria de celulose (EL-SAIED et al., 2004) e de suco de laranja (BELLIGNO et al., 2005) e resíduos de animais como de suínos (MBAGWU et al., 1994).

## **2.3 Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R)**

### **2.3.1 Definição, classificação e questão ambiental**

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em sua Resolução 307, de 5 de julho de 2002, fornece a seguinte definição para os RCD:

Resíduos da construção civil são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Na mesma resolução do CONAMA os RCD são classificados em quatro classes, de acordo com as possibilidades de reciclagem (A: reutilizáveis ou recicláveis como agregados; B: recicláveis para outras destinações, tais como os plásticos; e C: sem tecnologia de reciclagem economicamente viável; D: resíduos perigosos) (BRASIL, 2002). Neste trabalho serão utilizados apenas RCD *Classe A* que são compostos por materiais minerais como concretos, argamassas, tijolos e telhas cerâmicas, rochas naturais, solos entre outros, que, segundo Ângulo e John (2004), representam a maior fração dos resíduos gerados.

Os resíduos de construção civil representam mais de 50% dos resíduos sólidos produzidos nos centros urbanos (GESTÃO ambiental..., 2005). A Tabela 6 demonstra esta situação para alguns dos mais importantes municípios do estado de São Paulo.

Tabela 6 - Participação de RCD no total de resíduos sólidos gerados em alguns municípios do estado de São Paulo

<b>MUNICÍPIO</b>	<b>GERAÇÃO DIÁRIA (em toneladas)</b>	<b>PARTICIPAÇÃO EM RELAÇÃO AOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS</b>
São Paulo	17.240	55%
Guarulhos	1.308	50%
Diadema	458	57%
Campinas	1.800	64%
Piracicaba	620	67%
S. José dos Campos	733	67%
Ribeirão Preto	1.043	70%
Jundiaí	712	62%
S. José do Rio Preto	687	58%
Santo André	1.013	54%

Fonte: adaptado (GESTÃO ambiental..., 2005).

Adicionalmente, a maioria do RCD gerado acaba tendo uma disposição final inadequada provocando sérios impactos ambientais como: degradação das áreas de manancial e proteção permanente, proliferação de agentes transmissores de doenças, assoreamento de rios e córregos, obstrução dos sistemas de drenagem como piscinões, galerias e sarjetas, ocupação de vias e logradouros públicos com prejuízo à circulação de pessoas e veículos, e degradação da paisagem urbana. Além disso, caso esse material seja disposto em aterros, pode reduzir drasticamente a vida útil dos mesmos (SANTOS, 2007). A Figura 2 ilustra alguns exemplos de disposição final inadequada do RCD.



Figura 2 - RCD disposto às margens de um córrego (a esquerda) e obstruindo uma via pública (a direita)

### 2.3.2 Reciclagem do RCD

O RCD, se bem manejado, pode constituir-se em um produto com valor agregado com possibilidade de uso em diversas áreas como na construção civil, na fabricação de pré-moldados (blocos, briquetes, meio-fio e outros) ou utilizado na pavimentação ou contenção de encostas. Assim, a reciclagem desses resíduos tem-se tornado uma alternativa econômica e ambientalmente viável e dado origem a diversas usinas de reciclagem de RCD, instaladas em alguns municípios brasileiros, que separam o resíduo denominado classe A e moem este resíduo em diversas granulometrias. O material produzido nessas usinas é um agregado denominado RCD reciclado ou RCD-R. Como esse material é constituído basicamente de areia, cimento, cal e argila (cerâmica), dentre outros, tem similaridade com o solo e possui, em princípio, possibilidade de disposição e incorporação no solo sem danos ou alterações significativas na sua função.

Segundo Lima (1999), em geral é mais barato reciclar os resíduos do que gerenciar sua remoção de locais irregulares e aterramento. O custo do agregado reciclado, em “bica corrida”, é, em geral, menor que 4 reais por tonelada.

A Tabela 7 apresenta os custos de gerenciamento de resíduos de construção em alguns municípios do Brasil.

Tabela 7 - Custos de gerenciamento de resíduos de construção em alguns municípios

<b>MUNICÍPIO</b>	<b>CUSTO DE GERENCIAMENTO DE RCD</b>
Belo Horizonte/MG	US\$ 7,92 /t
São José dos Campos/SP	US\$ 10,66 /t
Ribeirão Preto/SP	R\$ 5,37 /t
São José do Rio Preto/SP	R\$ 11,78 /t

Fonte: adaptado LIMA (1999)

Entre os países da União Européia, da qual participam Holanda, Dinamarca e Alemanha que possuem índices de reciclagem de RCD entre 50% e 90%, existem também países com índices inferiores a 50%, como Portugal e Espanha. Com isso, a média de reciclagem desses resíduos na União Européia é de 28%, mas vem crescendo rapidamente (ANGULO, 2005).

No Brasil, os dados sobre a geração e a destinação de RCD são escassos. A maioria das usinas de reciclagem nacionais pertencem ao setor público e têm uma produção de pequena escala voltada ao consumo interno das prefeituras. Assim, os índices brasileiros de reciclagem de RCD são modestos. Além disso, as usinas de reciclagem brasileiras são relativamente simples se comparadas às estrangeiras (ANGULO, 2005).

Nas usinas de reciclagem, o RCD classe A geralmente é separado em dois tipos: o chamado material cinza que é proveniente de argamassas, concretos e reboques e o material vermelho que é proveniente de materiais cerâmicos como telhas e tijolos.

A Tabela 8 apresenta uma relação dos municípios brasileiros que possuem usinas de reciclagem de RCD instaladas até 2008.

Tabela 8 - Municípios brasileiros que possuem usinas de reciclagem de RCD instaladas

<b>MUNICÍPIO</b>	<b>PROPRIEDADE</b>	<b>INSTALAÇÃO</b>
São Paulo/SP	Prefeitura	1991
Londrina/PR	Prefeitura	1993
B. Horizonte (Estoril)	Prefeitura	1994
B. Horizonte (Pampulha)	Prefeitura	1996
Ribeirão Preto/SP	Prefeitura	1996
Piracicaba/SP	Autarquia/Emdhap	1996
São José dos Campos/SP	Prefeitura	1997
Muriaé/MG	Prefeitura	1997
São Paulo/SP	ATT Base	1998
Macaé/RJ	Prefeitura	1998
São Sebastião/DF	Adm. Regional	1999

Continua

<b>MUNICÍPIO</b>	<b>PROPRIEDADE</b>	<b>INSTALAÇÃO</b>
Socorro/SP	Irmãos Preto	2000
Guarulhos/SP	Prefeitura/Proguaru	2000
Vinhedo/SP	Prefeitura	2000
Brasília/DF	Caenge	2001
Fortaleza/CE	Usifort	2002
Ribeirão Pires/SP	Prefeitura	2003
Ciríaco/RS	Prefeitura	2003
São Gonçalo/RJ	Prefeitura	2004
Jundiaí/SP	SMR	2004
Campinas/SP	Prefeitura	2004
São B. do Campo/SP	Urbem	2005
São B. do Campo/SP	Ecoforte	2005
São José do Rio Preto/SP	Prefeitura	2005
São Carlos/SP	Prefeitura/Prohab	2005
B. Horizonte (BR040)/MG	Prefeitura	2006
Ponta Grossa/PR	P. Grossa Amb.	2006
Taboão da Serra/SP	Estação Ecologia	2006
João Pessoa /PB	Prefeitura/Emlur	2007
Caraguatatuba/SP	JC	2007
Colombo/PR	Soliforte	2007
Limeira/SP	RL Reciclagem	2007
Americana/SP	Cemara	2007
Piracicaba/SP	Autarquia/Semae	2007
Santa Maria/RS	GR2	2007
Osasco/SP	Inst. Nova Agora	2007
Rio das Ostras/RJ	Prefeitura	2007
Brasília/DF	CAENGE	2008
Londrina/PR	Kurica Ambiental	2008
São Luís/MA	Limpel	2008
São J. dos Campos/SP	RCC Ambiental	2008
Paulínia/SP	Estre Ambiental	2008
Guarulhos/SP	Henfer	2008
Barretos/SP	Prefeitura	2008
São José dos Campos/SP	Julix - Enterpa	2008
Petrolina/PE	Prefeitura	2008
Itaquaquecetuba/SP	Entrec Ambiental	2008

Fonte: adaptado Creta – Tecnologias em reciclagem

Em um estudo de caracterização química de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R), Ramalho e Pires (2009) mostraram que estes resíduos, adicionados a um solo ácido ( $\text{pH} = 5$ ) e de baixa fertilidade ( $\text{CTC} = 34$ ), apresentaram propriedades corretivas de acidez tendo neutralizado o  $\text{pH}$  e elevado a CTC para próximo de 100. Este resultado é uma indicação de que esses materiais podem apresentar efeitos corretivos de  $\text{pH}$  se incorporado a um solo ácido.

### 2.3.3 RCD-R cinza

O material cinza é basicamente composto de areia, cal hidratada e cimento portland. O calcário, que é o principal produto utilizado como corretivo de acidez do solo, é também a principal matéria prima utilizada na fabricação do cimento portland e da cal hidratada (MELLO FILHO, 2005).

Na produção do cimento portland, o calcário contribui na proporção de 85 a 95 %, ao qual é adicionada argila. A mistura calcário-argila é moída, homogeneizada e calcinada a uma temperatura de  $1450^{\circ}\text{C}$  em forno rotativo, obtendo-se o clínquer. O cimento portland é finalmente obtido a partir da moagem do clínquer com alguns aditivos como gesso (gipsita), calcário finamente moído (filler), pozolana e escória siderúrgica em diversas proporções para regular propriedades do cimento como o tempo de endurecimento e resistência, e para melhorar sua trabalhabilidade e acabamento (MARTINS et al., 2008). A Tabela 9 apresenta a composição química média dos cimentos portland brasileiros.

A cal hidratada utilizada na construção civil é obtida a partir da calcinação e moagem da rocha calcária magnesiana ou dolomítica e posterior hidratação, secagem e pulverização. O produto final é composto basicamente de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (MELLO FILHO, 2005).

Tabela 9 - Composição química média dos cimentos portland brasileiros

<b>Componente</b>	<b>Concentração (%)</b>
CaO	58,0 a 66,0
SiO <sub>2</sub>	19,0 a 25,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0 a 9,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5 a 4,5
MgO	0,3 a 6,1
SO <sub>3</sub>	0,8 a 3,0

Fonte: adaptado (MARTINS et al., 2008).

Em um estudo do RCD-R cinza proveniente da Usina de Itaquera, SP, Angulo (2005) verificou, por meio da técnica de Fluorescência de Raios X (FRX), que a composição química percentual da fração 1,2 a 2,4 mm para os óxidos SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO é de, respectivamente, 69,6; 6,5; 2,4; 9,2 e 1,2 além de outros constituintes menos expressivos.

#### **2.3.4 RCD-R vermelho**

Na prática, o RCD-R vermelho produzido nas usinas de reciclagem apresenta também certa quantidade variável do RCD-R cinza. Isto acontece principalmente porque tijolos e outros materiais cerâmicos provenientes de demolições, em geral, apresentam certa quantidade de massa de reboque ou argamassa de assentamento (material cinza) aderida às suas faces.

Em um estudo do RCD-R vermelho proveniente da Usina de Itaquera, SP, Angulo (2005) verificou, por meio da técnica de Fluorescência de Raios X (FRX), que a composição química percentual da fração 1,2 a 2,4 mm para os óxidos SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO é de, respectivamente, 68,6; 8,8; 3,2; 6,4 e 0,8 além de outros constituintes menos expressivos.

O material vermelho é proveniente da queima de vários tipos de argilas dependendo da região da qual são extraídas. Em geral, é constituído por argilas plásticas (caulinito-ilíticas) cujos componentes principais são os argilominerais (silicatos hidratados de alumínio), matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. São retiradas, geralmente, de margens de rios e lagos ou de várzeas (RIPOLI FILHO, 1997). De modo geral, os elementos que compõem as argilas são

silício, alumínio, ferro férrico e ferro ferroso, magnésio, oxigênio e grupos hidroxílicos.

As argilas possuem um importante papel no solo, pois representam sua fração coloidal que é quimicamente ativa. Elas podem apresentar altos valores de capacidade de troca de cátions (CTC) e de retenção de água devido à sua elevada superfície específica, estrutura em forma de lâminas (lamelas) e por apresentarem cargas elétricas superficiais (AMARO FILHO et al., 2008).

Existem duas unidades básicas que formam o padrão de construção dos diversos argilominerais. A primeira é o tetraedro de silício que possui um átomo de silício no centro da estrutura, ligado a quatro átomos de oxigênio dispostos nos vértices do tetraedro (Figura 3.a). A segunda unidade básica é o octaedro de alumínio que possui um átomo de alumínio no centro ligado a seis grupos hidroxílicos ou átomos de oxigênio dispostos nos vértices do octaedro (Figura 3.b).

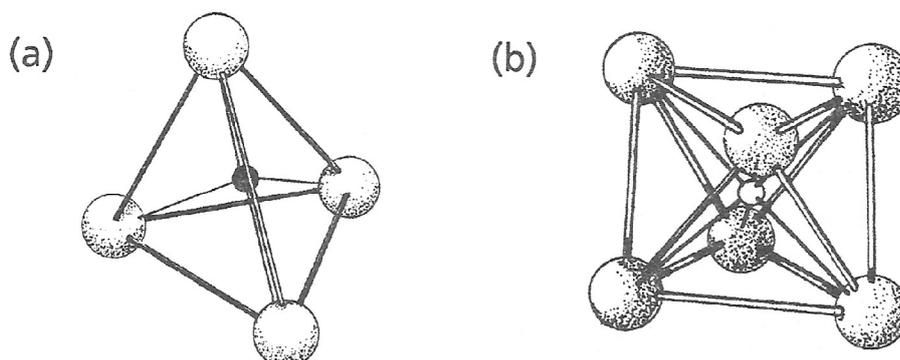


Figura 3 - Representação espacial das unidades básicas das argilas: tetraedro de silício (a) e octaedro de alumínio (b)

Fonte: adaptado (AMARO FILHO et al., 2008)

Os tetraedros de silício podem se ligar formando lâminas tetraédricas (sílica), bem como os octaedros de alumínio podem também se ligar formando lâminas octaédricas (alumina) numa estrutura polimérica que se repete. A união dessas lâminas tetraédricas e octaédricas dá origem às argilas que podem ser do tipo 1:1, quando ocorre a união entre uma lâmina tetraédrica com uma lâmina octaédrica (Figura 4.a), ou do tipo 2:1, quando ocorre a união de duas lâminas tetraédricas com uma lâmina octaédrica (Figura 4.b). Finalmente, a argila é constituída pelo empilhamento dessas lâminas compostas, denominadas lamelas. (AMARO FILHO et al., 2008).

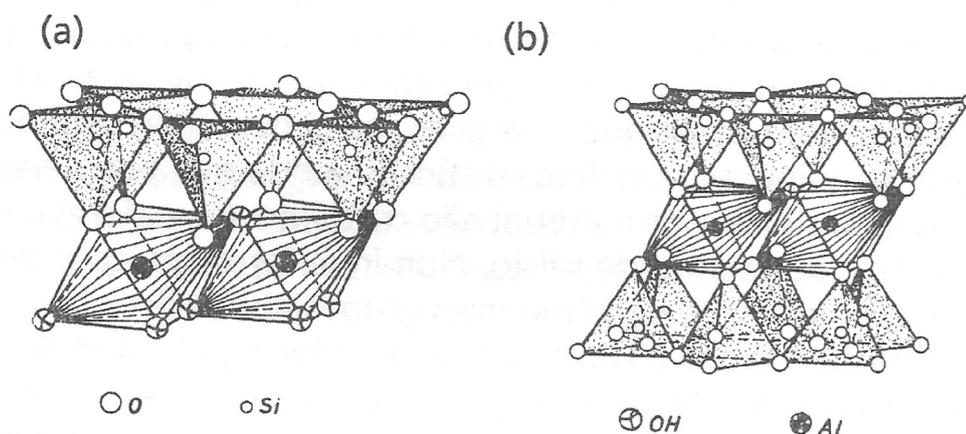


Figura 4 - Estrutura atômica dos minerais 1:1 (a) e 2:1 (b)  
 Fonte: adaptado (AMARO FILHO et al., 2008)

As células unitárias de um argilomineral são eletricamente neutras, entretanto podem ocorrer substituições isomórficas que quebram este equilíbrio elétrico. Por exemplo, quando um átomo de alumínio, trivalente, substitui o átomo tetravalente de silício na lâmina de sílica, ou quando os átomos bivalentes de magnésio ou ferro substituem o átomo trivalente de alumínio na lâmina de alumina, o resultado é uma carga negativa não balanceada. Dessa forma, a substituição isomórfica produz uma deficiência de cargas positivas na estrutura resultando em camadas carregadas negativamente. No caso da esmectita, por exemplo, o fenômeno da substituição isomórfica é bastante intenso. Esta carga negativa provoca a atração de cátions como  $\text{Ca}^{2+}$  para as camadas da superfície. Entretanto esta atração é fraca o suficiente para permitir que este cátion seja trocado por outro. Segundo Troeh e Thompson (2007, p. 203), “Esta ligação fraca de cátions, chamada de cátions trocáveis, é uma reserva importante de nutrientes para o crescimento da planta.”

Dependendo da origem e natureza da substituição, e do número de folhas de tetraedro de Si e octaedros de Al em estruturas interlaminares, as argilas são classificadas em vários grupos como: grupo da caulinita, grupo da montmorilonita ou esmectita, grupo das micas hidratadas, grupo da paligorskita ou argilas fibrosas, grupo das interestratificadas e grupo das alofanas (argilas amorfas – não cristalinas) (AMARO FILHO et al., 2008). A Tabela 10 apresenta algumas características de representantes destes grupos.

O RCD-R vermelho é proveniente de argilas que já foram queimadas a mais de  $800^{\circ}\text{C}$ . Assim, não apresenta mais a estrutura típica das argilas que lhe deram

origem nem as mesmas características. Entretanto, podem apresentar valores menores de CTC e superfície específica que ainda melhorem as condições de solos arenosos e de baixa fertilidade aos quais sejam incorporados.

Tabela 10 - Características de algumas argilas

<b>Mineral</b>	<b>Estrutura</b>	<b>CTC (mmolc. Kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Superfície específica (m<sup>2</sup>.g)</b>
Caulinita	1:1 não expandida	80 - 150	5 - 10
Esmectita	2:1 expandida	800 - 1500	700 - 800
Ilita	2:1 não expandida	200 - 400	100 - 200
Vermiculita	2:1 expandida	1000 - 2000	300 - 500
Clorita	2:1 expandida	200 - 400	-
Alofana	-	500 - 2000	400 - 700

Fonte: Amaro Filho et al. (2008) e Troeh e Thompson (2007)

### 2.3.5 Contaminantes potencialmente perigosos

Segundo Schaefer et al. (2007), a grande heterogeneidade de materiais e a grande variedade de fontes de RCD que dão origem aos agregados reciclados (RCD-R) conduzem à preocupação com a presença de contaminantes que possam se apresentar em concentrações perigosas, tais como metais pesados. Vários estudos têm sido desenvolvidos para avaliação da qualidade deste tipo de material e dos danos que possam causar ao meio ambiente. Na Flórida, foram encontrados altos níveis de metais pesados em RCD-R. Esses materiais podem provocar danos ambientais, como contaminação do solo e do lençol freático (TOWNSEND et al., 2004).

Ramalho e Pires (2009) analisaram a ocorrência de elementos potencialmente perigosos, por ICP-AES, no RCD-R produzido pela Usina de Reciclagem da Prohab no município de São Carlos – SP, obtendo os resultados mostrados na Tabela 11. Segundo estes mesmos autores,

Os resíduos apresentaram teores baixos de elementos potencialmente tóxicos quando comparados com os limites de contaminantes para insumos indicados na IN SDA 27 do MAPA (BRASIL, 2006). Portanto, essa não seria uma limitação para o uso dos mesmos na agricultura.

A Tabela 11 também apresenta os valores de alerta para metais pesados no solo, apontados por Filizola et al. (2006).

Tabela 11 – Teores de elementos potencialmente tóxicos encontrados em amostras de RCD-R cinza e vermelho produzidos pela Usina de Reciclagem da Prohab no município de São Carlos – SP e valores de alerta

<b>Elemento</b>	<b>RCD-R cinza</b> mg.kg <sup>-1</sup>	<b>RCD-R vermelho</b> mg.kg <sup>-1</sup>	<b>Valores de alerta</b> mg.kg <sup>-1</sup>
Arsênio	< 0,5	< 0,5	15
Cádmio	< 1,0	< 1,0	3
Chumbo	1,6	6,3	100
Cromo	9,4	20,3	75
Mercúrio	< 1,0	< 1,0	0,5
Níquel	2,2	2,7	30
Selênio	< 1,0	< 1,0	5
Zinco	10,2	20,6	300

Fonte: adaptado Ramalho e Pires (2009) e Filizola et al. (2006)

Em um estudo do comportamento de lixiviação de argamassas produzidas com agregados reciclados provenientes de duas centrais de processamento de São Bernardo do Campo – SP e de Campinas – SP, Schaefer et al. (2007) concluíram que metais pesados como As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Se e Zn lixiviam as argamassas produzidas com RCD-R, sendo que as maiores concentrações encontradas foram de Cu, Zn e Cd. Entretanto, nenhum valor de concentração lixiviada pelo período de 24 horas ultrapassou os limites recomendados pela NBR 10004 de 2004. Quando os mesmos resultados foram comparados aos limites da diretiva europeia 98/83/EC sobre qualidade de água para consumo humano, verificou-se que todos os valores eram superiores aos recomendados. Os resultados indicam que é importante incorporar uma avaliação de metais pesados como parâmetro de controle de qualidade dos RCD-Rs produzidos nas usinas de reciclagem (SCHAEFER et al., 2007).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O RCD-R utilizado foi o de classe A, fornecido pela Usina de Reciclagem da PROHAB no município de São Carlos – SP, com a qual foi estabelecida uma parceria. O RCD-R classe A exclui materiais como plásticos, papéis, madeiras, vidros, metais, tintas, solventes e materiais oriundos de demolições, reformas e reparos em clínicas radiológicas e instalações industriais.

A Usina de Reciclagem da PROHAB produz dois tipos de agregados de RCD-R: o material cinza (concretos, argamassas e reboques) e o material vermelho (cacos de telhas, tijolos e revestimentos de base cerâmica, também denominado chamote). A capacidade de produção da usina é de 160 toneladas por dia de RCD-R incluindo os dois tipos de materiais que são comercializados ao preço de R\$15,00 o metro cúbico.

O material bruto é levado por caçambeiros diretamente das obras para o pátio da usina onde é feita a separação entre o material cinza de base concreto e o material vermelho de base cerâmica (chamote) e uma triagem visual para retirada daqueles materiais que não se enquadram na classificação de resíduo classe A do CONAMA. Peças grandes de material de base concreto como vigas e colunas são fragmentadas a marretadas antes do processamento.

Depois de processado, o material cinza (base concreto) é separado por peneiras em quatro classes granulométricas denominadas: pedregulho ou rachão (fração > 19mm), brita ou pedra nº 1 (fração entre 9,5 e 19mm), pedrisco (fração entre 2,4 e 9,5mm), e areia grossa (fração < 2,4mm). Neste trabalho foi utilizada apenas a fração denominada areia grossa.

O material vermelho (base cerâmica) não sofre separação por peneiras, sendo produzido diretamente em bica corrida.

Em todas as coletas de amostras de RCD-R realizadas na usina para os experimentos, foi tomado o cuidado de se coletar do material recém processado. No ato da coleta, os materiais foram peneirados em malha de 2mm, sendo aproveitada apenas a fração que passava pela peneira. Este material era imediatamente armazenado em bombonas plásticas de 50 litros nas quais era transportado ao laboratório e secado em estufa a 100°C por 24 horas.

A Figura 5 mostra algumas fotos da Usina de Reciclagem da PROHAB no município de São Carlos – SP e dos resíduos antes e depois do processamento.



Figura 5 - (A) Frente da Usina de Reciclagem da PROHAB em São Carlos - SP, (B) vista do terminal de saída da esteira que carrega o material processado e do monte formado por este material, (C) material cinza de base concreto já separado, antes do processamento, (D) material vermelho de base cerâmica (chamote) já separado, antes do processamento, (E) material cinza já processado e peneirado em malha de 2mm e (F) material vermelho já processado e peneirado em malha de 2mm

### **3.1 Experimentos preliminares**

#### **3.1.1 Curvas de umidade**

Com o objetivo de estimar as doses de RCD-R a serem utilizadas posteriormente no experimento com cultura de alfafa, foi realizado um experimento prévio, tomando por base um Neossolo Quartzarênico órtico (areia: 86%, silte: 6%, argila: 8%), aqui denominado simplesmente solo arenoso, que consistiu no peneiramento em malha de 2mm e secagem em estufa de aproximadamente 2Kg deste solo e 1Kg do RCD-R cinza. Posteriormente, foram preparadas misturas homogêneas deste RCD-R com o solo arenoso nas doses de 10%, 20%, 30% e 100% em massa preenchendo anéis volumétricos de aço de 5cm de diâmetro e 5cm de altura, com papel de filtro colado ao fundo, em triplicata (três anéis com cada dose do material), além de mais três anéis testemunhas apenas com o solo arenoso. Adicionalmente, foram preparados mais três anéis com um Nitossolo Vermelho eutroférico (areia: 18%, silte: 16%, argila: 66%), aqui denominado simplesmente solo argiloso.

Após a preparação dos anéis, estes foram saturados em água por 48 horas, pesados e deixados secar ao ar livre no laboratório. A partir da saturação, a umidade dos solos e misturas foi medida diariamente a fim de levantar as curvas de umidade durante a secagem.

Posteriormente, este mesmo experimento foi repetido com as mesmas doses do RCD-R vermelho com a diferença de que, após a saturação, a secagem foi em estufa a 40°C para aumentar a taxa de evaporação, que é muito lenta para o solo argiloso em condição de evaporação natural.

#### **3.1.2 Análise química dos resíduos reciclados**

A partir de uma amostra do RCD-R cinza (concreto) e uma amostra do RCD-R vermelho (chamote) peneirados em malha de 2mm, foram retiradas alíquotas de 100g para realização de análise química de fertilidade no Laboratório de Solos da Embrapa Pecuária Sudeste, localizada em São Carlos, SP, segundo a metodologia descrita por Raij (2001).

### 3.2 Caracterização e análise da variabilidade do RCD-R

Com o objetivo de caracterizar e avaliar a variabilidade dos materiais produzidos pela usina de reciclagem, foram realizadas 5 coletas de amostras dos RCD-R cinza (concreto) e RCD-R vermelho (chamote) recém-processados, com intervalos de 3 meses aproximadamente entre uma e outra, fechando o ciclo de um ano de produção da Usina da Prohab de São Carlos. Em cada amostragem eram coletados materiais de 5 pontos diferentes do monte de RCD-R recém-processado e misturados, obtendo uma amostra composta com aproximadamente 5kg. O materiais coletados eram peneirados em malha de 2mm e secos em estufa a 100°C por 24 horas, logo após a coleta.

A Tabela 12 apresenta a nomenclatura adotada para essas amostras.

Tabela 12 – Datas das coletas de amostras dos RCD-R cinza e vermelho e nomenclatura adotada para estas amostras

<b>Data da coleta</b>	<b>RCD-R cinza</b>	<b>RCD-R vermelho</b>
28/08/2009	cinza 1	vermelho 1
23/11/2009	cinza 2	vermelho 2
26/02/2010	cinza 3	vermelho 3
20/05/2010	cinza 4	vermelho 4
21/08/2010	cinza 5	vermelho 5

Foram utilizadas as técnicas de espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX) e Difratometria de Raios X (DRX) para analisar, respectivamente, a composição química e mineralógica das amostras. Foram também medidos os teores de CaO e MgO, o poder de neutralização (PN) e o poder relativo de neutralização total (PRNT) das amostras cinza 1, cinza 2 e cinza 3.

#### 3.2.1 Espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX)

A espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica que permite analisar qualitativa e quantitativamente a composição química de amostras sólidas ou líquidas (BELMONTE, 2005). Segundo o mesmo autor, a técnica consiste em expor a amostra a um feixe de radiação gama ou raios X de alta energia para a

excitação, induzindo transições eletrônicas nas camadas mais internas dos átomos (K e L) para níveis de energia mais elevados. Ao retornar ao estado fundamental, os elétrons excitados emitem uma radiação fluorescente na faixa dos raios X correspondentes às transições  $L \rightarrow K$ ,  $M \rightarrow K$  ou  $M \rightarrow L$ . O espectro de energia destas transições é único para cada tipo de elemento, o que permite fazer sua identificação.

Para análise de FRX foram tomadas 10g de cada amostra (cinza 1, 2, 3, 4 e 5, e vermelho 1, 2, 3, 4 e 5) e separadas alíquotas de 0,5000g de cada amostra que foram fundidas com tetraborato de lítio em cadinhos de platina, formando pastilhas que foram encaminhadas para leitura no espectrômetro de FRX. Estas análises foram realizadas nos laboratórios da SGS Geosol em Vespasiano, MG, utilizando o espectrômetro fabricado pela Panalytical, série Axios, modelo PW 4400/40, ilustrado na Figura 6.



Figura 6 - Espectrômetro de Fluorescência de Raios X da marca Panalytical utilizado

### 3.2.2 Difractometria de Raios X (DRX)

A Difractometria por Raios X (DRX) é uma importante técnica de caracterização microestrutural de materiais cristalinos que permite identificar as fases cristalinas (compostos mineralógicos) presentes na amostra. A técnica baseia-se na propriedade dos cristais de difratar os feixes de raios X. A DRX já é largamente aplicada em várias áreas do conhecimento como ciência dos materiais, geociências, engenharias metalúrgica, química e de minas, entre outras (CALLISTER JUNIOR, 2002).

Para a análise de DRX foram separadas alíquotas de, aproximadamente, 3g de cada amostra (cinza 1, 2, 3, 4 e 5, e vermelho 1, 2, 3, 4 e 5). Foi utilizado um porta-amostras de alumínio com uma cavidade circular onde cada alíquota foi colocada e prensada, de modo a ficar com sua superfície plana e faceando o porta-amostras.

Para as medidas foi utilizado um difratômetro de raios X, marca Shimadzu, modelo XRD-6000, tubo com alvo de cobre, tensão de operação 30 kV e corrente de operação 30 mA, instalado no Laboratório de Técnicas Nucleares da Embrapa Instrumentação em São Carlos, SP. Foi feita varredura angular contínua entre 15° e 75°, com velocidade de 2°/min. O porta-amostras, bem como o difratômetro utilizado são mostrados na Figura 7.

Os difratogramas foram analisados com o auxílio do programa computacional *Crystallographica Search-Match*, versão 2, 1, 1, 1.

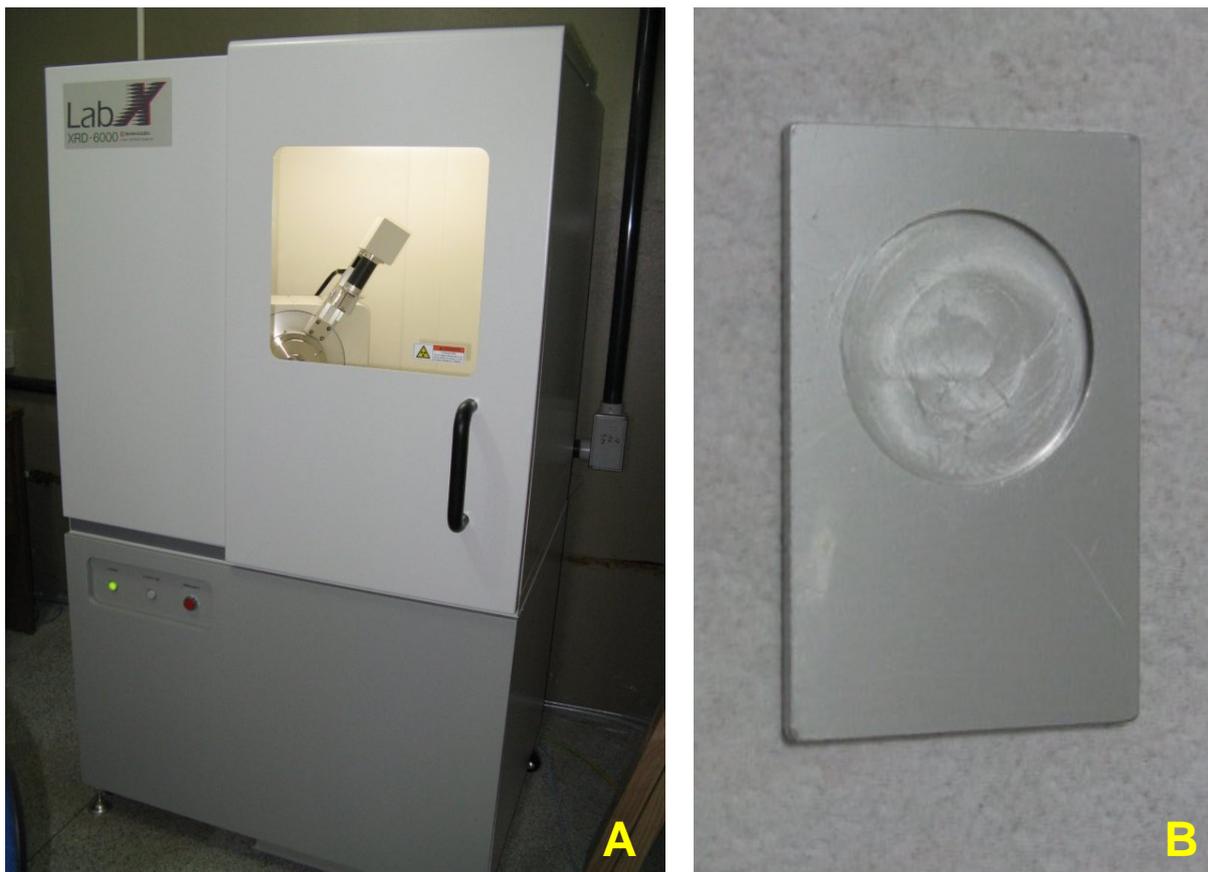


Figura 7 - (A) Difratorômetro de raios X da marca Shimadzu, modelo XRD-6000 utilizado e (B) porta-amostras utilizado

### 3.2.3 Medidas dos teores de CaO e MgO, PN e PRNT

Para as medidas dos teores de CaO e MgO e dos valores do poder de neutralização (PN) e do poder relativo de neutralização total (PRNT), foram tomados 500g de cada uma das amostras cinza 1, cinza 2 e cinza 3 e realizadas as medidas segundo a metodologia descrita na Instrução Normativa No. 28 do MAPA (BRASIL, 2007), no Laboratório de Fertilizantes e Resíduos do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Campinas, SP.

### 3.3 Experimento com cultura de alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula)

Para este experimento, foram coletados RCD-R recém processados do tipo cinza e do tipo vermelho, peneirados em malha de 2mm, sendo aproveitada apenas a fração que passava pela peneira, obtendo-se aproximadamente 150kg de cada tipo.

A fim de se obter um material com granulometria mais fina, parte do material coletado sofreu uma moagem adicional em um moinho de jarros com bolas, de movimento excêntrico, da marca Servitech, modelo CT 242, mostrado na Figura 8.

Após esta moagem adicional, os materiais foram peneirados em malha de 500 $\mu$ m, sendo aproveitada apenas a fração que passava pela peneira.

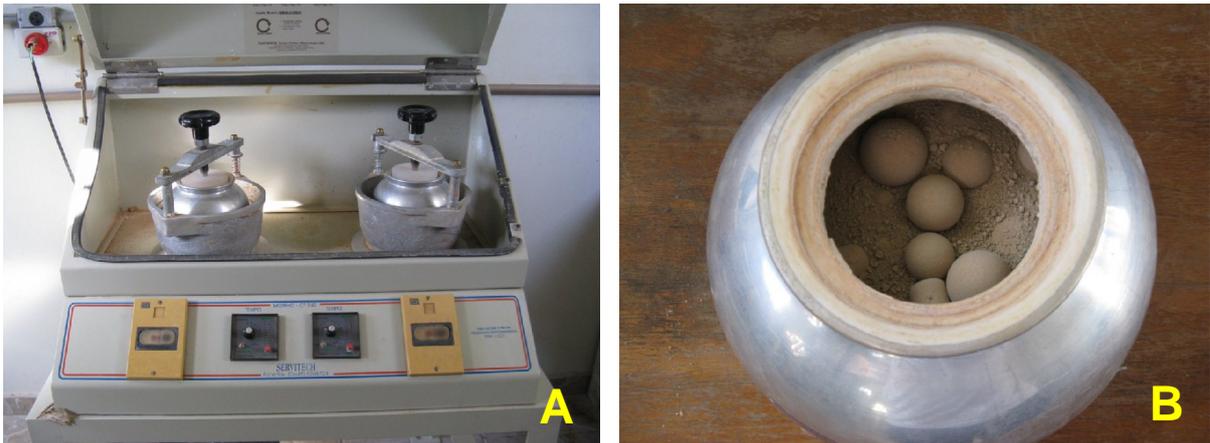


Figura 8 - (A) Moinho fabricado pela Servitech, modelo CT 242, utilizado na moagem adicional do RCD-R e (B) um dos jarros do moinho com as bolas e o RCD-R em processo de moagem

Dessa forma, foram obtidos quatro tipos de RCD-R: o cinza e o vermelho de granulometria mais grossa (que não sofreram a moagem e peneiramento adicionais), e o cinza e o vermelho de granulometria mais fina (que sofreram a moagem e peneiramento adicionais). Esses quatro materiais, mostrados na Figura 9, foram assim denominados: cinza fino (CF), cinza grosso (CG), vermelho fino (VF) e vermelho grosso (VG).

Ao final deste processo, foram obtidos 40kg de cada tipo de material, aproximadamente.

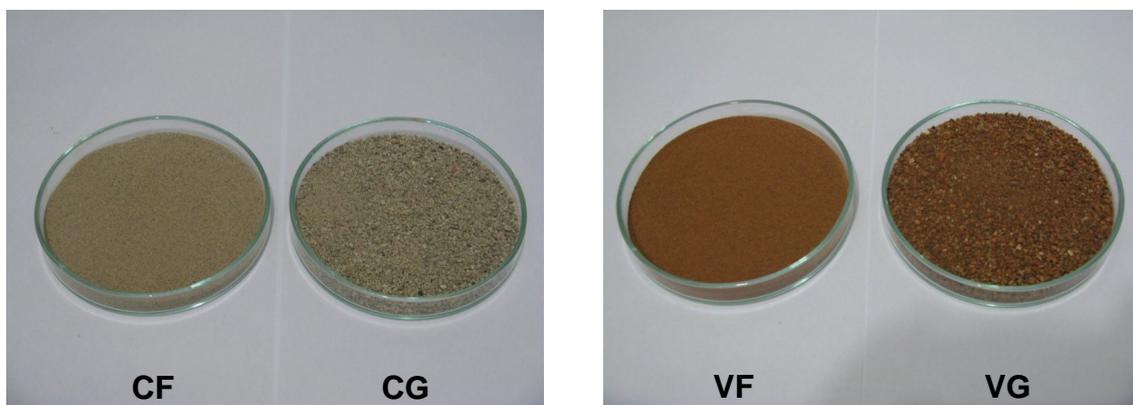


Figura 9 - RCD-R dos tipos cinza fino (CF), cinza grosso (CG), vermelho fino (VF) e vermelho grosso (VG)

### 3.3.1 Caracterização de CF, CG, VF e VG

Com o objetivo de caracterizar os RCD-R dos tipos CF, CG, VF e VG, foram utilizadas as seguintes técnicas: Espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX), Difractometria de Raios X (DRX) e medidas dos teores de CaO e MgO, PN e PRNT (este último apenas para os materiais CF e CG), segundo as mesmas metodologias descritas nos itens 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3.

### 3.3.2 Experimento com RCD-R cinza (concreto)

Os RCD-R dos tipos CF e CG foram misturados homogeneamente em doses de 0 (testemunha), 10, 20 e 40%, base de massa, a um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico ácido e de baixa fertilidade, previamente peneirado em malha de 2mm. O Latossolo utilizado apresentava textura média (franco argilo arenosa) com a seguinte distribuição granulométrica: areia: 58,4%, silte: 5,3% e argila: 36,3%. Este solo e suas misturas com CF e CG foram acondicionados em vasos de 10 litros para o cultivo da alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula) em casa de vegetação (Figura 10). A alfafa foi escolhida como planta de teste por ser muito sensível a acidez do solo e estresse hídrico, e por ter um ciclo de curta duração, permitindo um corte a cada trinta dias, aproximadamente (MOREIRA et al., 2007).

Os vasos foram irrigados diariamente procurando manter a umidade do solo próximo da capacidade de campo, tomando-se o cuidado de evitar percolado e de irrigar todos os vasos com a mesma quantidade de água. A fim de orientar a primeira rega, a capacidade de campo do solo foi determinada pelo método TSFM (torrão separado pela frente de molhamento), conforme metodologia proposta por Costa (1983). Em uma amostra de 150 g de solo, contida em béquer de 500 mL, gotejou-se 2 mL de água destilada em 40 segundos. Após esse procedimento, realizado com três repetições, o torrão úmido formado (separado do resto do solo pela frente de molhamento) foi colocado em uma placa de Petri e levado à estufa a 100°C, por 24 horas. O torrão foi pesado, e a capacidade de campo foi calculada pela diferença entre os pesos das amostras úmida e seca. O valor obtido para capacidade de campo foi de  $0,19 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ .

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos, ao acaso, em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1 + 2$ , com três repetições, consistindo em vinte e sete unidades experimentais. Os tratamentos consistiram, portanto, dos dois materiais (CF e CG), com as três doses, o tratamento testemunha (dose 0%) e dois tratamentos adicionais com calagem convencional com calcário (PRNT = 93%) em dois níveis de saturação por bases,  $V\%=60$  e  $V\%=80$  que equivalem, respectivamente, às doses de 0,08% e 0,33%, base de massa.

Após um período de incubação de 35 dias da data de montagem dos vasos, foi realizada a primeira amostragem (A) dos solos dos vasos na camada 3-5 cm para análise química de fertilidade, realizada no Laboratório de Solos da Embrapa Pecuária Sudeste segundo a metodologia descrita por Rajj (2001).

O plantio foi realizado 4,5 meses após a montagem dos vasos, semeando-se dez sementes por vaso. Nesse momento, foi também feita adubação balanceada com P, K e micronutrientes incorporados ao solo. Quando as mudas apresentavam aproximadamente 5 cm de altura, foram selecionadas as cinco melhores mudas de cada vaso para permanecerem, sendo retiradas as demais.



Figura 10 - Plantio de alfafa em casa de vegetação da Embrapa Pecuária Sudeste em São Carlos, SP

O primeiro corte, para medidas da produção de matéria seca (MS), foi realizado 100 dias após a semeadura, quando as plantas apresentavam aproximadamente 10% de florescimento. A altura padronizada para os cortes foi de 5 cm do solo.

Para as avaliações da produção de matéria seca (MS), a matéria fresca cortada de cada tratamento foi acondicionada separadamente em sacos de papel identificados e, posteriormente, secos em estufa de circulação forçada de ar a 70°C até peso constante. Após a secagem, a matéria seca (MS) foi pesada em balança semi-analítica, com precisão de 0,1 g.

Na data do primeiro corte, foi também realizada a segunda amostragem (B) dos solos dos vasos na camada 3-5 cm para análise química de fertilidade.

Depois disso, foram realizados mais seis cortes da alfafa, espaçados por aproximadamente trinta dias, sempre quando as plantas apresentavam em torno de 10% de florescimento. Logo após o sétimo e último corte, foi realizada a terceira amostragem (C) dos solos dos vasos na camada 3-5 cm para análise química de fertilidade. Nesta mesma data, foi amostrado também o solo do fundo dos vasos dos tratamentos com dose de 40%, para verificar se estava ocorrendo transporte dos materiais, ocasionando uma maior concentração no fundo. Dessa forma, as amostragens A e B foram espaçadas por um intervalo de sete meses e as amostragens B e C, espaçadas por um intervalo de seis meses, aproximadamente.

A Tabela 13 apresenta a nomenclatura adotada para esses tratamentos com os RCD-R dos tipos CF e CG.

Tabela 13 – Nomenclatura adotada para os tratamentos com os RCD-R dos tipos CF e CG

<b>Tratamento</b>	<b>Nomenclatura</b>
Vaso com o solo LVA apenas (testemunha)	Solo natural
Vaso com 10% de CF	CF10
Vaso com 20% de CF	CF20
Vaso com 40% de CF	CF40
Vaso com 10% de CG	CG10
Vaso com 20% de CG	CG20
Vaso com 40% de CG	CG40
Vaso com o solo LVA + calagem com calcário V% = 60	V% 60
Vaso com o solo LVA + calagem com calcário V% = 80	V% 80

### 3.3.3 Experimento com RCD-R vermelho (chamote)

Os RCD-R dos tipos VF e VG foram misturados homogeneamente em doses de 0 (testemunha), 10, 20 e 40%, base de massa, ao mesmo Latossolo Vermelho Amarelo distrófico mencionado no item 3.3.2, o qual recebeu uma calagem com calcário (PRNT = 93%) no nível de saturação por bases de  $V\% = 80$ . Este solo e suas misturas com VF e VG foram acondicionados em vasos de 10 litros para o cultivo da alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula) em casa de vegetação, procedendo-se da forma como descrito no item 3.3.2.

O delineamento experimental utilizado, neste caso, foi o de blocos, ao acaso, em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1 + 3$ , com três repetições, consistindo em trinta unidades experimentais. Os tratamentos constaram, portanto, dos dois materiais (VF e VG), com as três doses, o tratamento testemunha (dose 0%) e três tratamentos adicionais submetidos a estresse hídrico (com irrigação a cada dois dias) para as doses de 20% dos materiais VF e VG e a testemunha (dose 0%).

A Tabela 14 apresenta a nomenclatura adotada para esses tratamentos com os RCD-R dos tipos VF e VG.

Tabela 14 – Nomenclatura adotada para os tratamentos com os RCD-R dos tipos VF e VG

Tratamento	Nomenclatura
Vaso com solo LVA + calagem c/ calcário $V\% = 80$ (testemunha)	$V\% = 80$ (testemunha)
Vaso com 10% de VF + calagem c/ calcário $V\% = 80$	VF10
Vaso com 20% de VF + calagem c/ calcário $V\% = 80$	VF20
Vaso com 40% de VF + calagem c/ calcário $V\% = 80$	VF40
Vaso com 10% de VG + calagem c/ calcário $V\% = 80$	VG10
Vaso com 20% de VG + calagem c/ calcário $V\% = 80$	VG20
Vaso com 40% de VG + calagem c/ calcário $V\% = 80$	VG40
Vaso c/ solo LVA + calcário $V\% = 80$ c/ estresse hídrico (testem.)	testemunha - estresse
Vaso c/ 20% de VF + calcário $V\% = 80$ c/ estresse hídrico	VF20 - estresse
Vaso c/ 20% de VG + calcário $V\% = 80$ c/ estresse hídrico	VG20 - estresse

Quando da primeira e da segunda amostragens (A e B) dos solos dos vasos para análise química de fertilidade, foram também retiradas amostras indeformadas com anéis volumétricos de aço inoxidável, de 5 cm de diâmetro por 3 cm de altura, na camada 3-6 cm, para obtenção das curvas características de retenção de água no solo pelo método das câmaras de Richards, descrito por Camargo et al. (2009). Estas medidas foram realizadas para os seguintes valores de potenciais matriciais: 0 kPa (solo saturado), 2 kPa, 4 kPa, 8 kPa, 10 kPa, 33 kPa, 100 kPa, 500 kPa e 1500 kPa (PMP). Cada conjunto completo de pares de dados de umidade versus potencial foi ajustado ao modelo de van Genuchten (1980), mostrado na Equação 29, adotando-se a restrição:  $m = 1 - (1/n)$ .

$$\theta = \theta_{res} + (\theta_{sat} - \theta_{res}) [1 + (\alpha \cdot h)^n]^{-m} \quad (29)$$

Sendo:

- $\theta$  a umidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ );
- $\theta_{res}$  a umidade residual do solo ( $m^3 m^{-3}$ );
- $\theta_{sat}$  a umidade de saturação do solo ( $m^3 m^{-3}$ );
- $h$  o potencial matricial da água no solo (kPa);
- $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  parâmetros de ajuste adimensionais.

Os parâmetros de ajuste foram obtidos pelo método não-linear de mínimos quadrados (WRAITH; OR, 1998), usando a ferramenta *solver* do Excel (Microsoft®). No ajuste foi sempre fixado o valor de  $\theta_{sat}$  pelo valor medido, deixando os demais parâmetros variarem.

O eixo de umidade das curvas de retenção foi normalizado, sendo apresentada a umidade relativa à  $\theta_{sat}$ , que foi adotada como referência.

As medidas para obtenção das curvas características de retenção de água foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Campinas, SP.

A Figura 11 mostra fotos dos conjuntos de câmaras de Richards do IAC, utilizados neste experimento.



Figura 11 - Conjuntos de câmaras de Richards do IAC, utilizados neste experimento

A Figura 12 mostra o cronograma geral do experimento com plantio de alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula).

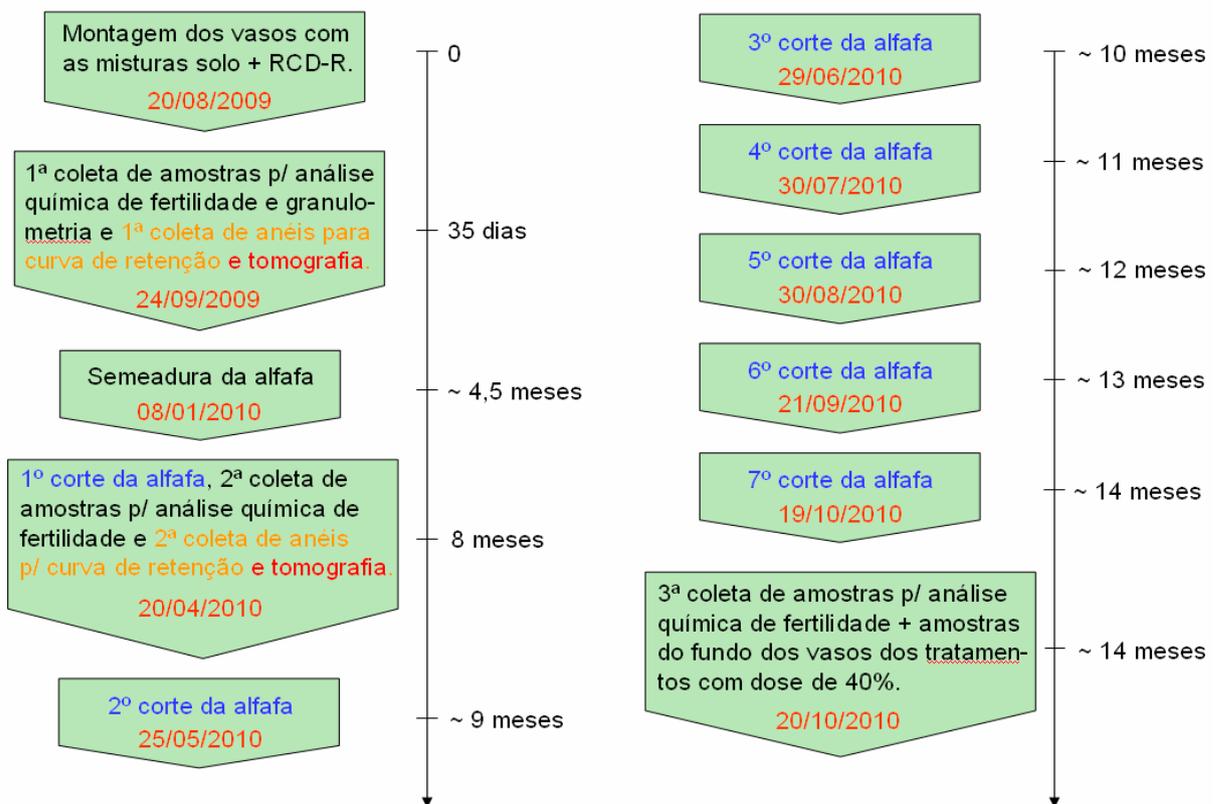


Figura 12 - Cronograma do experimento com plantio de alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula)

### 3.3.4 Análise granulométrica por radiação gama

Foram realizadas análises granulométricas dos RCD-R dos tipos CF, CG, VF e VG e do solo dos vasos com as várias doses desses RCD-R. Para essas medidas, foram tomadas amostras de cada material em triplicata e depois pesadas 40 gramas de cada uma e secas em estufa a 105°C por 24 horas. Posteriormente, as amostras foram pré-dispersas por uma noite em solução com 10 ml de NaOH 1N em 200 mL de água destilada e, pela manhã, foram dispersas mecanicamente com agitador de alta rotação (modelo 936-2, da Hamilton Beach, USA) durante 15 minutos e depois analisadas em grupos de 10 amostras no analisador granulométrico automático (Figura 13) desenvolvido na Embrapa Instrumentação (NAIME et al., 2001). O equipamento utilizado é composto por uma fonte de Amerício-241 (atividade 300 mCi), detector de cintilação NaI e eletrônica para detecção, contagem, armazenamento e controle. Maiores detalhes do funcionamento do equipamento podem ser encontrados em Naime et al. (2001) e detalhes do método podem ser encontrados em Vaz et al. (1999).



Figura 13 - Analisador granulométrico automático desenvolvido na Embrapa Instrumentação

### 3.3.5 Microtomografia computadorizada de raios X (Micro TC)

A Microtomografia Computadorizada (Micro TC) é uma técnica que permite a obtenção de imagens de alta resolução (na escala micrométrica) de seções transversais de um objeto, de forma não destrutiva. O princípio de funcionamento do microtomógrafo de raios-X baseia-se na propriedade dos materiais absorverem esta radiação de forma diferenciada dependendo de sua composição química e densidade (SILVA et al., 1997).

Mais que uma simples chapa radiográfica, a Micro TC divide virtualmente o objeto de estudo em fatias (tomos) nas quais são mapeados parâmetros físicos como a densidade e a porosidade de cada região interna do objeto que são apresentadas na forma de imagens bidimensionais que podem ser compostas de modo a se obter objetos virtuais 3D, por meio de algoritmos computacionais. Por exemplo, no caso do solo é possível visualizar a estrutura interna de agregados, poros, canais, diferentes partículas e materiais, bem como se estudar processos dinâmicos de absorção e retenção de água (LASSO et al., 2008). Além disso, permite a medida de atributos físicos do solo como a porosidade. Entretanto, segundo Stock (2008), pode-se considerar grosseiramente que apenas os poros com diâmetros superiores ao dobro da resolução espacial das imagens (voxels) sejam contabilizados na medida de porosidade.

No experimento com plantio de alfafa, quando da primeira e da segunda amostragens (A e B) dos solos dos vasos para análise química de fertilidade, foram também retiradas amostras indeformadas dos solos dos tratamentos com RCD-R vermelho, com irrigação diária, utilizando anéis volumétricos de PVC, de 4 cm de diâmetro por 3 cm de altura, na camada 3-6 cm, para análise por microtomografia de raios X.

O microtomógrafo utilizado foi o modelo 1172 de fabricação da SkyScan (Figura 14) instalado no Laboratório de Técnicas Nucleares da Embrapa Instrumentação, em São Carlos, SP. No processo de aquisição das imagens foram adotados os seguintes parâmetros: filtro de alumínio + cobre, resolução espacial (tamanho do voxel) de 12 $\mu$ m, passo de rotação de 0,4 $^{\circ}$ , rotação de 180 $^{\circ}$  e 12 quadros (*frames*) para processo de média (*averaging*). O processo de reconstrução

das imagens dos cortes tomográficos foi realizado por meio do *software* NRecon da SkyScan no qual foram adotados os seguintes parâmetros: *smoothing: 5, ring artifact correction: 5 e beam hardening correction: 60%*.

A medida de porosidade a partir das imagens de Micro CT foi feita por meio do *software* CTAn da SkyScan. A partir do conjunto de imagens tomográficas de cada amostra foi selecionada uma região de interesse (ROI) circular, com diâmetro de 25mm, no centro das imagens para evitar efeitos de borda devido ao processo de amostragem do solo. A Figura 15 mostra um exemplo das ROIs selecionadas.



Figura 14 - Microtomógrafo SkyScan, modelo 1172, instalado na Embrapa Instrumentação

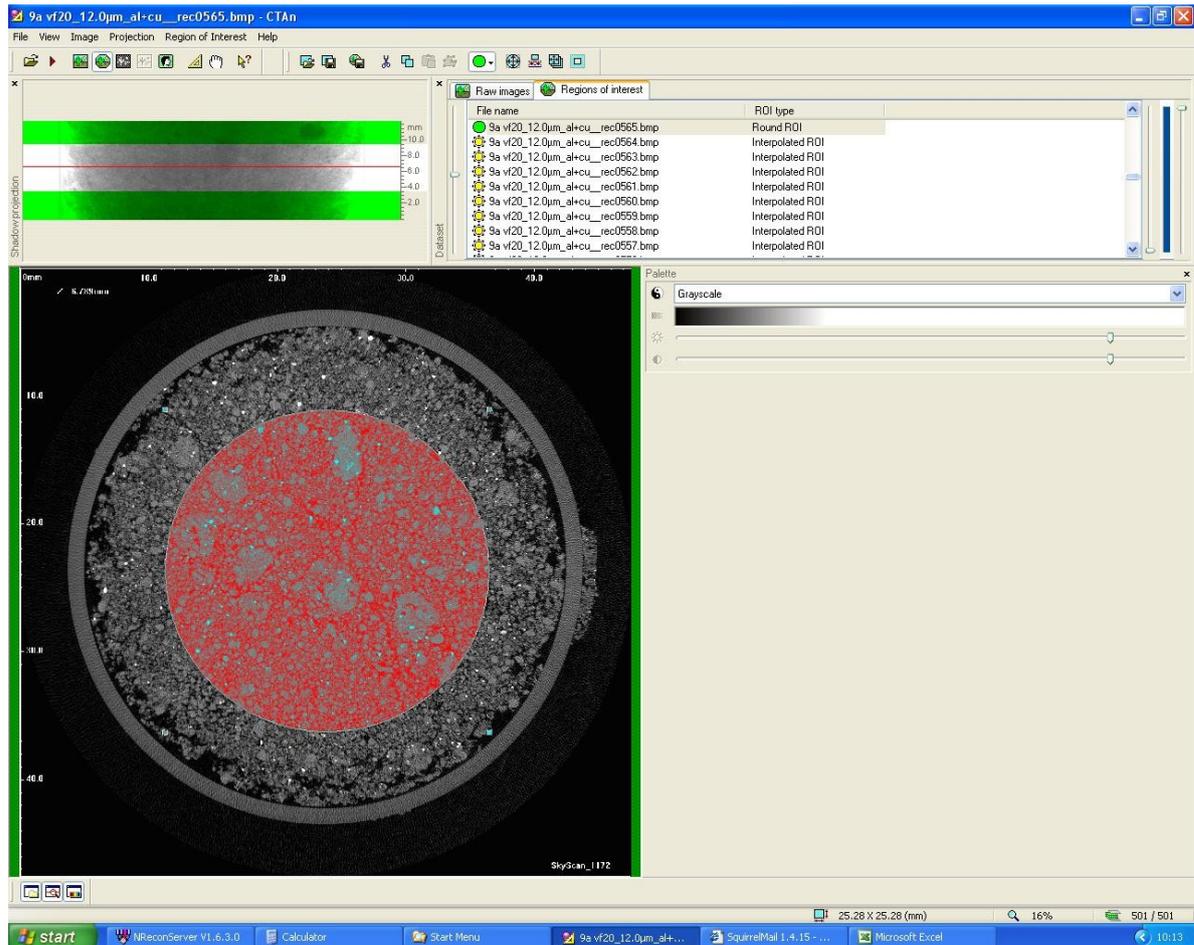


Figura 15 - Tela do *software* CTAn da SkyScan com exemplo de região de interesse (ROI) selecionada para análise

A porosidade foi obtida por meio do processo de segmentação entre as fases aérea e sólida no qual é selecionado um *thresholding* que corresponde ao valor médio entre os picos principais do ar e da fase sólida no histograma de coeficientes de atenuação linear da imagem total (3-D). Este processo produz uma imagem binária 3-D da ROI selecionada (VOI). A Figura 16 mostra a imagem de um corte desta imagem binária. O *software* CTAn calcula a porosidade a partir da relação entre os volumes da fase aérea e total da VOI.

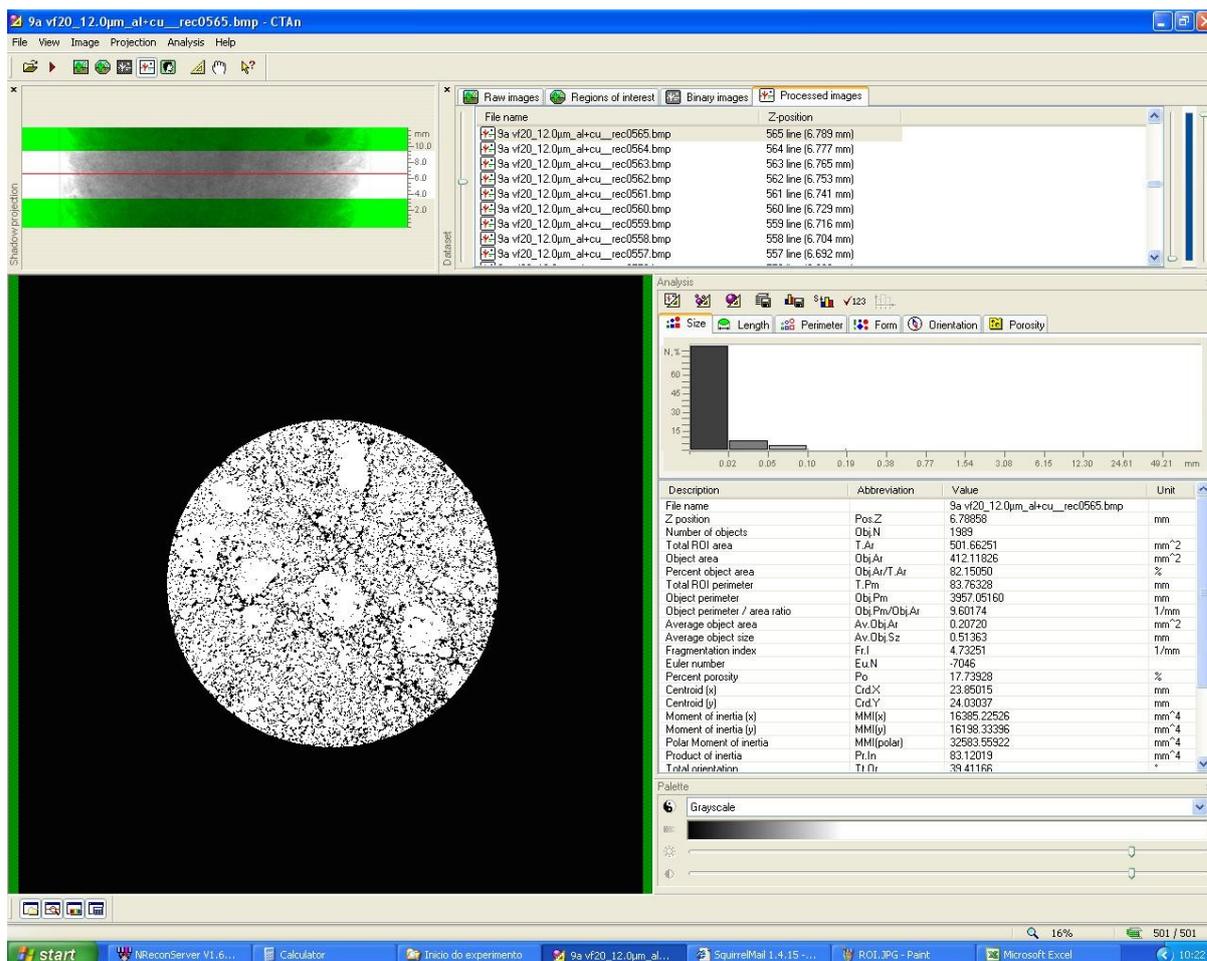


Figura 16 - Tela do software CTAn da SkyScan com exemplo de um corte da imagem binária da ROI seleccionada

### 3.4 Curvas de neutralização da acidez do solo com CF e CG

Foram realizadas misturas homogêneas dos RCD-R dos tipos CF e CG em doses de 0, 5, 10, 20 e 40%, base de massa, ao mesmo Latossolo Vermelho Amarelo distrófico mencionado no item 3.3.2. Para fins de comparação, foram também realizadas misturas homogêneas de calcário (PRNT = 93%) em doses equivalentes a 2, 4, 6 e 8 t/ha ao mesmo solo. Estas doses de calcário foram denominadas, respectivamente, D1, D2, D3 e D4.

O solo e suas misturas com CF, CG e calcário foram colocados em recipientes plásticos (copos) de 200 ml, sendo 100 g por copo. O experimento foi conduzido em laboratório, utilizando o delineamento fatorial  $3 \times 4 + 1$ , com três repetições, consistindo em trinta e nove unidades experimentais. Os tratamentos

constaram, portanto, dos três materiais (CF, CG e calcário), com as quatro doses e o tratamento testemunha (dose 0%).

Os solos foram mantidos úmidos, sendo incubados por períodos de 30 e 120 dias, ao final dos quais, foram amostrados para análise química de fertilidade, realizada no Laboratório de Solos da Embrapa Pecuária Sudeste segundo a metodologia descrita por Raij (2001).

A nomenclatura adotada para esses tratamentos foi: CF 30d, CG 30d, CF 120d, CG 120d, Calc 30d e Calc 120d.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Experimentos preliminares

#### 4.1.1 Curvas de umidade

As Figuras 17 e 18 apresentam as curvas de umidade de um Neossolo Quartzarênico Órtico (solo arenoso) puro e com as adições dos RCD-R cinza e vermelho, respectivamente, durante sua secagem, conforme metodologia descrita no item 3.1.1. É apresentada também a curva de umidade de um Nitossolo Vermelho Eutroférico (solo argiloso) sem adição do RCD-R.

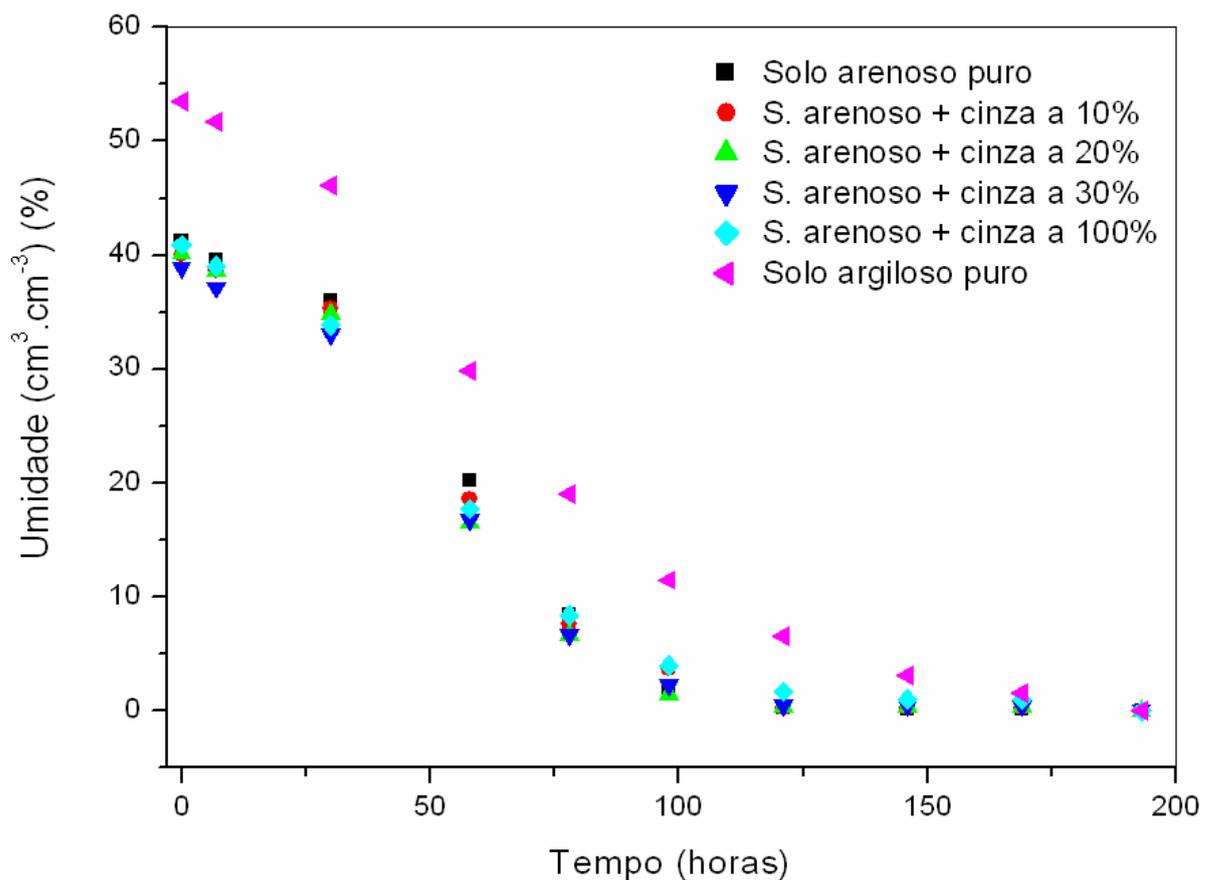


Figura 17 - Curvas de umidade de um Neossolo Quartzarênico Órtico (solo arenoso) puro e com a adição das doses 10, 20, 30 e 100% do RCD-R cinza, durante a sua secagem. É apresentada também a curva de umidade de um Nitossolo Vermelho Eutroférico (solo argiloso) sem adição do RCD-R

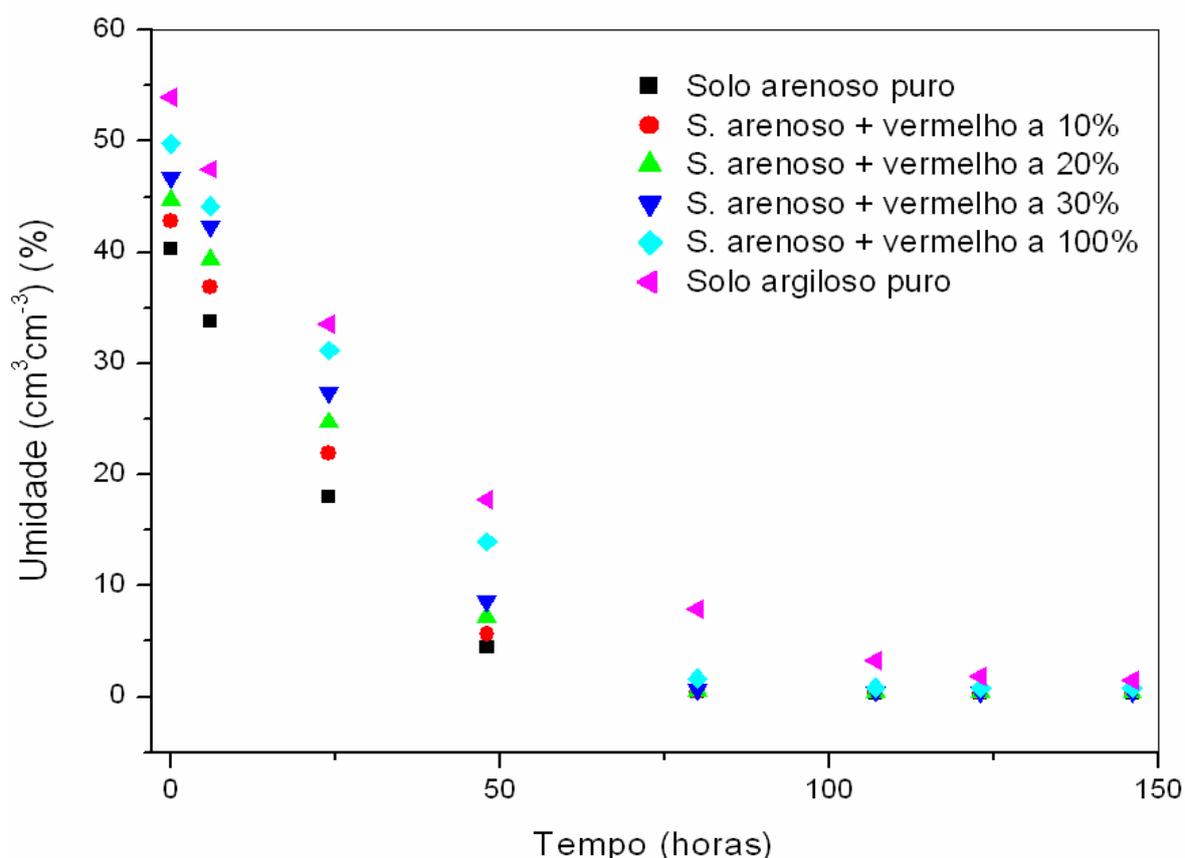


Figura 18 - Curvas de umidade de um Neossolo Quartzarênico Órtico (solo arenoso) puro e com a adição das doses 10, 20, 30 e 100% do RCD-R vermelho, durante a sua secagem. É apresentada também a curva de umidade de um Nitossolo Vermelho Eutroférico (solo argiloso) sem adição do RCD-R

Com base nas curvas apresentadas na Figura 17, verificou-se que a adição de RCD-R cinza não contribuiu para o aumento da capacidade de retenção de água em qualquer uma das doses utilizadas, mas, pelo contrário, chegou a prejudicar um pouco a capacidade de retenção de água em relação ao solo arenoso puro (sem adição do RCD-R cinza).

Por outro lado, com base nas curvas apresentadas na Figura 18, verificou-se que a adição de RCD-R vermelho contribuiu para o aumento da capacidade de retenção de água do solo arenoso, de modo crescente com as doses aplicadas, quando comparado ao solo arenoso puro (sem adição do RCD-R vermelho). Verificou-se que a adição do RCD-R vermelho ao solo arenoso reduziu as diferenças entre os seus valores de umidade e os do solo argiloso. Entretanto, mesmo o RCD-R vermelho puro (dose de 100%) obteve valores de umidade inferiores aos do solo argiloso. Os resultados desse experimento são indícios de que o RCD-R vermelho pode funcionar como condicionador para aumento da capacidade de retenção de água de solos arenosos.

#### 4.1.2 Análise química preliminar dos resíduos reciclados

A Tabela 15 apresenta os resultados preliminares obtidos de uma análise química dos RCD-R cinza e vermelho, conforme metodologia descrita no item 3.1.2.

Tabela 15 – Resultados preliminares da análise química dos resíduos cinza e vermelho reciclados

	Unidade	RCD-R cinza	RCD-R vermelho
<b>pH</b>		<b>9,8</b>	8,5
<b>M.O.</b>	g/dm <sup>3</sup>	5,0	5,0
<b>P resina</b>	mg/dm <sup>3</sup>	110	49
<b>K</b>	mmol/dm <sup>3</sup>	4,5	4,3
<b>Ca</b>	mmol/dm <sup>3</sup>	<b>1999</b>	23
<b>Mg</b>	mmol/dm <sup>3</sup>	<b>106</b>	59
<b>H + Al</b>	mmol/dm <sup>3</sup>	2	6
<b>CTC</b>	mmol/dm <sup>3</sup>	<b>2111</b>	92
<b>V</b>	%	<b>100</b>	94

Os dois resíduos analisados apresentaram baixo teor de matéria orgânica (5 g/dm<sup>3</sup>) equivalente a, aproximadamente, 0,3% em massa, considerando a densidade dos resíduos igual a 1,5 kg/dm<sup>3</sup>. Isso está coerente com o histórico desses resíduos nos quais esperava-se encontrar apenas materiais de origem mineral. Esse baixo teor de matéria orgânica observado é, provavelmente, proveniente de pequenos pedaços de madeira ou plástico que não foram retirados no processo de triagem visual antes do processamento do RCD.

Tanto o RCD-R cinza como o vermelho apresentaram pH alcalino, mas, em especial, o cinza atingiu o valor mais elevado de 9,8. Além disso, o RCD-R cinza apresentou alto teor de Mg e altíssimos valores de teor de Ca, CTC e saturação por bases V%. Estes dados são indícios de que o RCD-R cinza pode funcionar como corretivo de acidez de solos, pois, segundo Alcarde (2005), materiais corretivos de acidez do solo são produtos que, além de serem capazes de neutralizar ou reduzir a acidez, devem ainda carrear nutrientes vegetais ao solo, principalmente cálcio e magnésio.

## 4.2 Caracterização e análise da variabilidade do RCD-R

### 4.2.1 Espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX)

Os resultados das análises de FRX das cinco amostras do RCD-R cinza e vermelho coletadas ao longo de um ano de produção da usina de reciclagem, conforme metodologia descrita no item 3.2.1, são apresentados nas Tabelas 16 e 17, respectivamente.

Tabela 16 – Resultados das análises de FRX das amostras de cinza 1, 2, 3, 4 e 5

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	LOI
	%										
cinza 1	82,3	2,88	2,57	6,91	0,64	0,43	0,062	0,17	0,46	0,05	4,73
cinza 2	78,9	3,21	2,57	7,50	0,68	0,45	0,063	0,18	0,40	0,07	5,16
cinza 3	78,2	3,61	2,92	7,46	0,68	0,55	0,060	0,14	0,41	0,06	6,43
cinza 4	81,2	2,63	2,21	8,39	0,63	0,34	0,045	< 0,1	0,26	0,07	5,32
cinza 5	79,7	2,77	2,47	8,67	0,62	0,36	0,047	0,10	0,26	0,07	5,35
<b>Média</b>	<b>80,1</b>	<b>3,02</b>	<b>2,55</b>	<b>7,79</b>	<b>0,65</b>	<b>0,43</b>	<b>0,06</b>	<b>0,15</b>	<b>0,36</b>	<b>0,06</b>	<b>5,40</b>
DP	1,68	0,39	0,26	0,73	0,03	0,08	0,01	0,04	0,09	0,01	0,63
CV	2,1	13,0	10,0	9,3	4,4	19,5	15,7	24,4	25,8	14,0	11,6
LD	0,1	0,10	0,01	0,01	0,10	0,01	0,01	0,1	0,01	0,01	

Tabela 17 – Resultados das análises de FRX das amostras de vermelho 1, 2, 3, 4 e 5.

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	LOI
	%										
cinza 1	77,9	6,33	4,00	4,65	0,77	0,75	0,06	0,11	0,46	0,04	5,55
cinza 2	80,7	5,58	3,70	3,78	0,68	0,67	0,05	<0,1	0,30	0,04	5,22
cinza 3	81,1	5,92	4,44	3,11	0,44	0,89	0,06	<0,1	0,28	0,04	4,68
cinza 4	79,2	6,98	4,47	3,22	0,55	0,84	0,06	<0,1	0,32	0,04	5,15
cinza 5	79,2	6,54	4,39	3,28	0,63	0,84	0,07	<0,1	0,30	0,04	5,20
<b>Média</b>	<b>79,6</b>	<b>6,27</b>	<b>4,20</b>	<b>3,61</b>	<b>0,61</b>	<b>0,80</b>	<b>0,06</b>	-	<b>0,33</b>	<b>0,04</b>	<b>5,16</b>
<b>DP</b>	1,29	0,54	0,34	0,64	0,13	0,09	0,01	-	0,07	0	0,31
<b>CV</b>	1,6	8,7	8,0	17,6	20,5	11,0	10,3	-	22,0	0,0	6,0
<b>LD</b>	0,1	0,10	0,01	0,01	0,10	0,01	0,01	0,1	0,01	0,01	

LOI: "loss of ignition", DP: desvio padrão, CV: coeficiente de variação, LD: limite de detecção da técnica para cada componente mineral

Na preparação das amostras para análise de FRX, estas são fundidas com tetraborato de lítio em cadinhos de platina. Nesse processo, os materiais das amostras são todos oxidados e, por isso, os resultados são apresentados na forma de óxidos.

Nos resultados apresentados nas Tabelas 16 e 17, os componentes com concentrações médias mais expressivas (acima de 0,5%) foram destacados em amarelo. Em geral, esses foram coerentes com os resultados obtidos por Angulo (2005), descritos nos itens 2.3.3 e 2.3.4. O elemento que mais se destacou, tanto no RCD-R cinza como no vermelho, foi o Si, com concentração de aproximadamente 80% nos dois casos, com coeficiente de variação (CV) muito baixo, da ordem de 2%. Para o RCD-R cinza, principalmente, este resultado é coerente com o histórico desse resíduo que é oriundo de concretos que, em sua elaboração, levam em média, 3 medidas de areia, 1 de pedra e 1 de cimento, se for para aplicação estrutural, ou 9 medidas de areia, 2 de cal e 1 de cimento, se for reboco.

No caso do RCD-R cinza, além do Si, outro elemento que se destaca é o Ca com uma concentração média de quase 8%, o que é coerente com os resultados das análises químicas preliminares apresentadas no item 4.1.2. Esta expressiva quantidade de cálcio detectada no RCD-R cinza é provavelmente proveniente do CaCO<sub>3</sub> do calcário presente no cimento portland e na cal hidratada utilizados na

elaboração de concretos e argamassas, lembrando que o calcário é uma das principais matérias-primas desses materiais de construção, como descrito no item 2.1.

A pequena concentração de Mg encontrada nesse RCD-R deve ter sua origem no  $MgCO_3$  presente também no calcário que pode ser calcítico, magnesiano ou dolomítico, com teores variados de  $MgCO_3$ , como descrito no item 2.1. A presença de Al e Fe em baixas concentrações no RCD-R cinza deve ter origem na argila utilizada na fabricação do cimento portland, conforme também descrito no item 2.1.

No caso do RCD-R vermelho, a grande quantidade de Si justifica-se não só pela presença de quartzo, mas também pela presença de silicatos de Al e de Fe provenientes das argilas que deram origem a esse resíduo. Isto também justifica as expressivas concentrações de Al e Fe encontrados nesse RCD-R. No RCD-R vermelho também foi detectado Ca em menores proporções, provavelmente devido à presença de RCD-R cinza como contaminante do vermelho.

A LOI (*loss on ignition*) representa a porcentagem de material perdido por aquecimento como a matéria orgânica e voláteis presentes. Outros elementos com concentrações pouco expressivas, também detectados, foram Ti, P, Na, K e Mn.

O coeficiente de variação (CV) entre as amostras coletadas ao longo de um ano foi relativamente baixo (< 20%) para a maioria dos elementos principais de cada tipo de RCD-R. Isso indica que existe um razoável grau de padronização, tanto na produção de concretos, como de peças cerâmicas utilizados na construção civil.

#### **4.2.2 Difratometria de Raios X (DRX)**

As Figuras 19 e 20 apresentam, respectivamente, os padrões de difração dos RCD-R cinza e vermelho, obtidos segundo a metodologia descrita no item 3.2.2. Na legenda, os números associados aos minerais identificados indicam a ficha mineralógica utilizada.

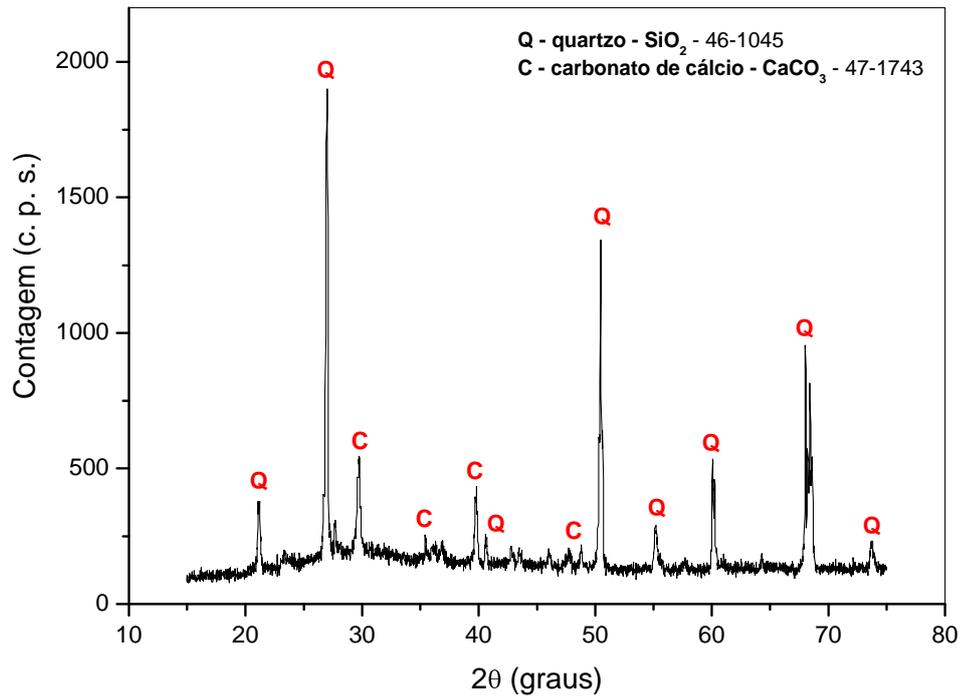


Figura 19 - Difratoograma do RCD-R cinza

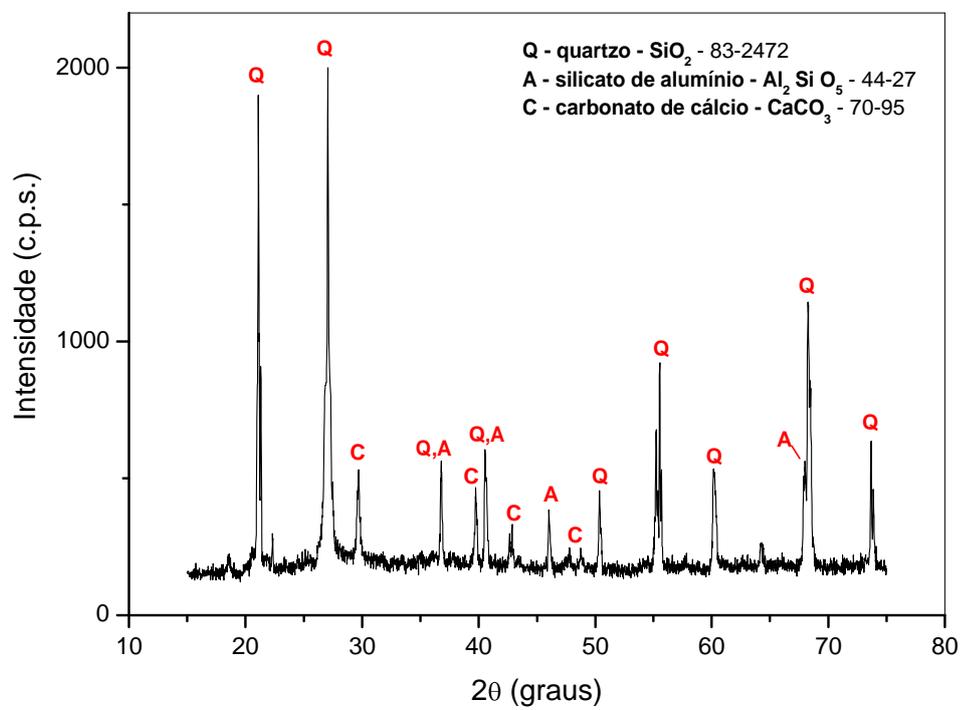


Figura 20 - Difratoograma do RCD-R vermelho

As cinco amostras de RCD-R cinza e de RCD-R vermelho seguiram os mesmos padrões apresentados nas Figuras 19 e 20, respectivamente.

No caso do RCD-R cinza, foram detectadas apenas as fases cristalinas de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Coerentemente com os resultados de FRX, os picos referentes ao quartzo foram os mais intensos. Não foram detectadas fases de silicatos de alumínio e ferro, o que é um indicativo de que praticamente todo o silício presente nesse RCD-R está associado ao quartzo, isto é, 80% desse material é composto por quartzo.

No caso do RCD-R vermelho, o resultado de DRX também está coerente com o de FRX. Além das fases cristalinas de quartzo e carbonato de cálcio, foi também detectada uma fase de silicato de alumínio que deve incluir também silicato de ferro, uma vez que o ferro é o substituto isomórfico mais comum do alumínio. Assim, no caso do RCD-R vermelho, nem todo o silício está associado ao quartzo, mas há uma parcela associada aos silicatos também.

#### 4.2.3 Medidas dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT

A Tabela 18 apresenta os resultados das medidas dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT das amostras cinza 1, 2 e 3, conforme metodologia descrita no item 3.2.3.

Tabela 18 - Resultados das medidas dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT das amostras cinza 1, cinza 2 e cinza 3.

	Teor de CaO + MgO	PN	PRNT
	%	%	%
<b>Cinza 1</b>	7,9	19,6	13,1
<b>Cinza 2</b>	9,4	20,1	13,5
<b>Cinza 3</b>	8,6	20,4	13,7
<b>Média</b>	<b>8,6</b>	<b>20,0</b>	<b>13,4</b>
<b>DP</b>	0,8	0,4	0,3
<b>CV</b>	0,09	0,02	0,02

*DP: desvio padrão, CV: coeficiente de variação*

Conforme mostrado na Tabela 4 do item 2.1.3, os valores mínimos dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT exigidos pela legislação brasileira para registro e comercialização de corretivos de pH do solo são, respectivamente, 38%, 67% e 45%. Os valores obtidos nessa análise para as amostras do RCD-R cinza, mostrados na Tabela 18, estão muito aquém dos requeridos pela legislação. Embora os resultados da análise química preliminar (Tabela 15) colocassem o RCD-R cinza como um potencial corretivo de acidez do solo, os resultados dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT deixam claro que os valores desses índices para o RCD-R cinza são insuficientes para o registro e comercialização como corretivos de pH do solo.

Entretanto, os resultados das análises de FRX e DRX do RCD-R cinza mostraram que 80% deste material é composto por quartzo e que a participação do Ca e do Mg, somadas, nesse RCD-R, é de apenas 8,5%. Como os efeitos de correção de pH estão associados principalmente ao Ca e ao Mg, se o RCD-R cinza passasse por um processo de separação e retirada do quartzo, concentrando a parte ativa do material, é provável que os valores dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT se enquadrassem dentro dos exigidos pela legislação, possibilitando seu registro e comercialização como corretivo de acidez do solo. Outra vantagem que isso proporcionaria seria uma grande redução da massa e volume do material, barateando seu transporte.

### **4.3 Experimento com cultura de alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula)**

#### **4.3.1 Caracterização das frações CF, CG, VF e VG**

Os resultados da análise de FRX para os RCD-R do tipo CF, CG, VF e VG, conforme metodologia descrita no item 3.3.1, são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados das análises de FRX dos RCD-R do tipo CF, CG, VF e VG

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	LOI
%											
<b>CF</b>	79,7	2,87	2,17	8,39	0,52	0,39	0,064	0,11	0,38	0,05	5,64
<b>CG</b>	79,7	2,89	2,33	8,1	0,58	0,43	0,058	0,14	0,42	0,06	5,33
<b>VF</b>	74,4	9,26	5,1	2,94	0,76	1,58	0,124	0,1	0,34	0,04	4,73
<b>VG</b>	74,0	9,64	5,35	2,86	0,78	1,67	0,13	0,2	0,36	0,05	4,54
<b>LD</b>	0,1	0,10	0,01	0,01	0,10	0,01	0,01	0,1	0,01	0,01	

*LD: limite de detecção da técnica para cada componente mineral*

Os resultados de FRX mostraram que não existe diferença significativa entre os materiais finos e os grossos, isto é, a moagem adicional e o peneiramento em malha de 500µm não alteraram a composição química dos RCD-R.

As concentrações dos principais componentes de cada tipo de RCD-R não diferem significativamente das médias obtidas na análise de variabilidade das amostras de RCD-R coletadas ao longo de um ano de produção da usina de reciclagem. Isto significa que os materiais CF, CG, VF e VG utilizados no experimento com cultura de alfafa são representativos dos RCD-R produzidos pela usina de reciclagem da Prohab de São Carlos.

Os resultados das análises de DRX de CF, CG, VF e VG apresentaram difratogramas que seguiram os mesmos padrões dos obtidos no experimento de análise de variabilidade apresentados no item 4.2.2, reforçando que CF, CG, VF e VG são representativos dos RCD-R produzidos pela usina de reciclagem.

A Tabela 20 apresenta os resultados das medidas dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT de CF e CG, conforme metodologia descrita no item 3.3.1.

Tabela 20 - Resultados das medidas dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT de CF e CG

	Teor de CaO + MgO	PN	PRNT
	%	%	%
<b>CF</b>	9,5	19,2	19,0
<b>CG</b>	8,6	19,4	13,0

Os resultados dos teores de CaO + MgO, PN e PRNT de CF e CG estão coerentes com os obtidos no experimento de análise de variabilidade apresentados no item 4.2.3. O único valor que sofreu um desvio significativo foi o PRNT do CF que foi quase 42% maior que a média dos valores de PRNT das amostras cinza 1, 2 e 3. A razão disso é que a granulometria mais fina do material CF aumentou a sua reatividade, que tem impacto direto no PRNT.

#### 4.3.2 Análise granulométrica por radiação gama

As curvas da distribuição granulométrica de CF, CG, VF e VG, obtidas conforme metodologia descrita no item 3.3.4, são mostradas na Figura 21.

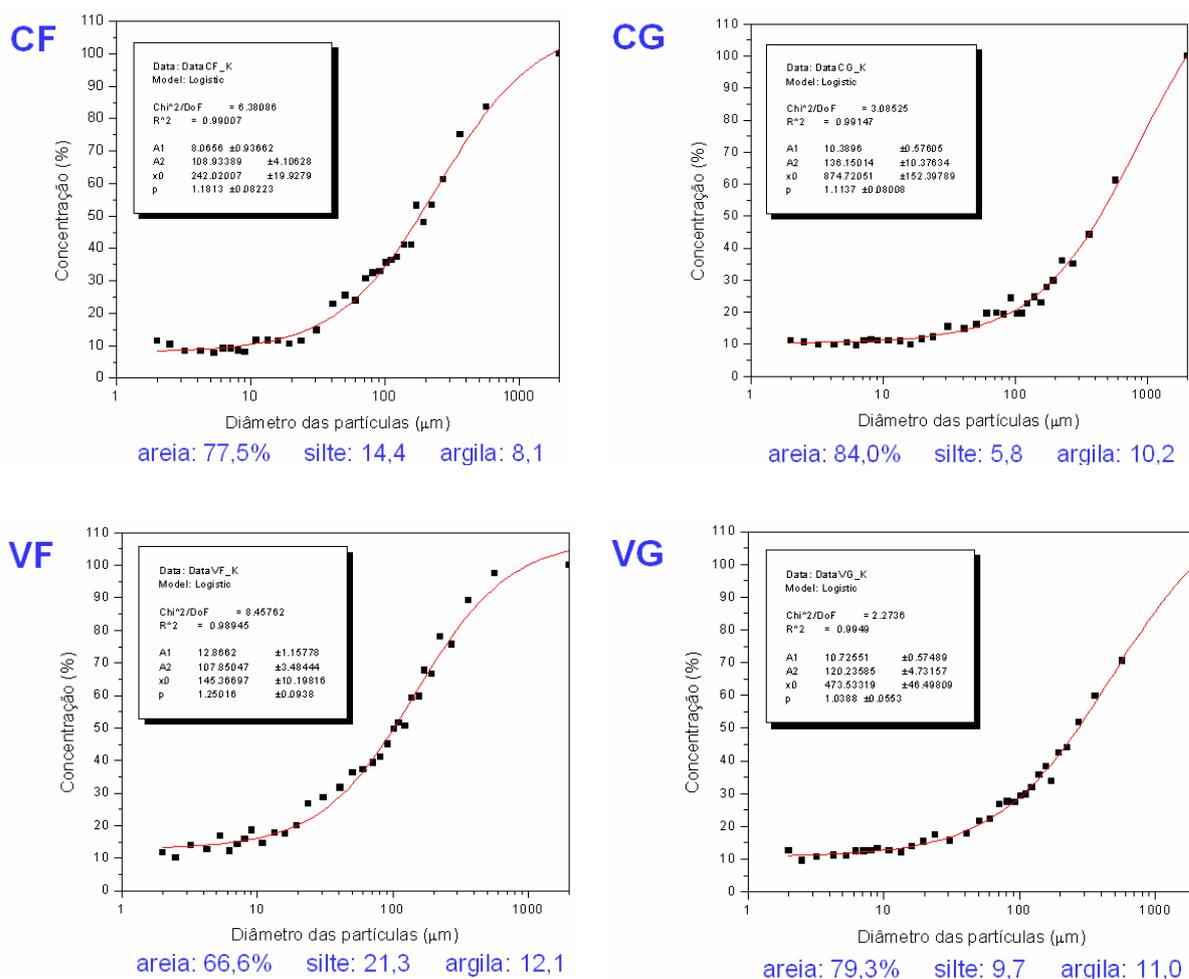


Figura 21 - Curvas da distribuição granulométrica de CF, CG, VF e VG

As curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos CF10, CF20 e CF40 são mostradas na Figura 22.

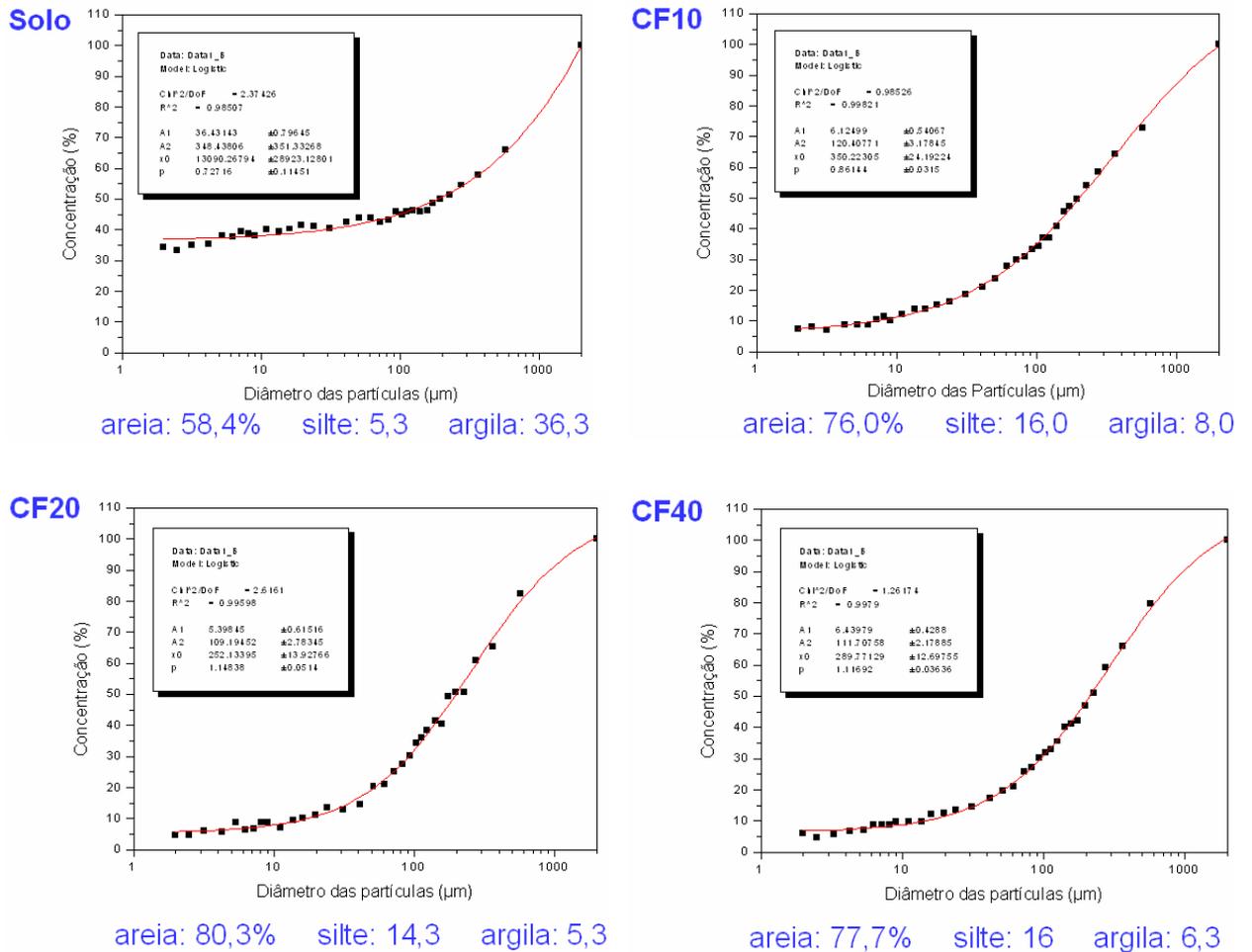


Figura 22 - Curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos CF10, CF20 e CF40

As curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos CG10, CG20 e CG40 são mostradas na Figura 23.

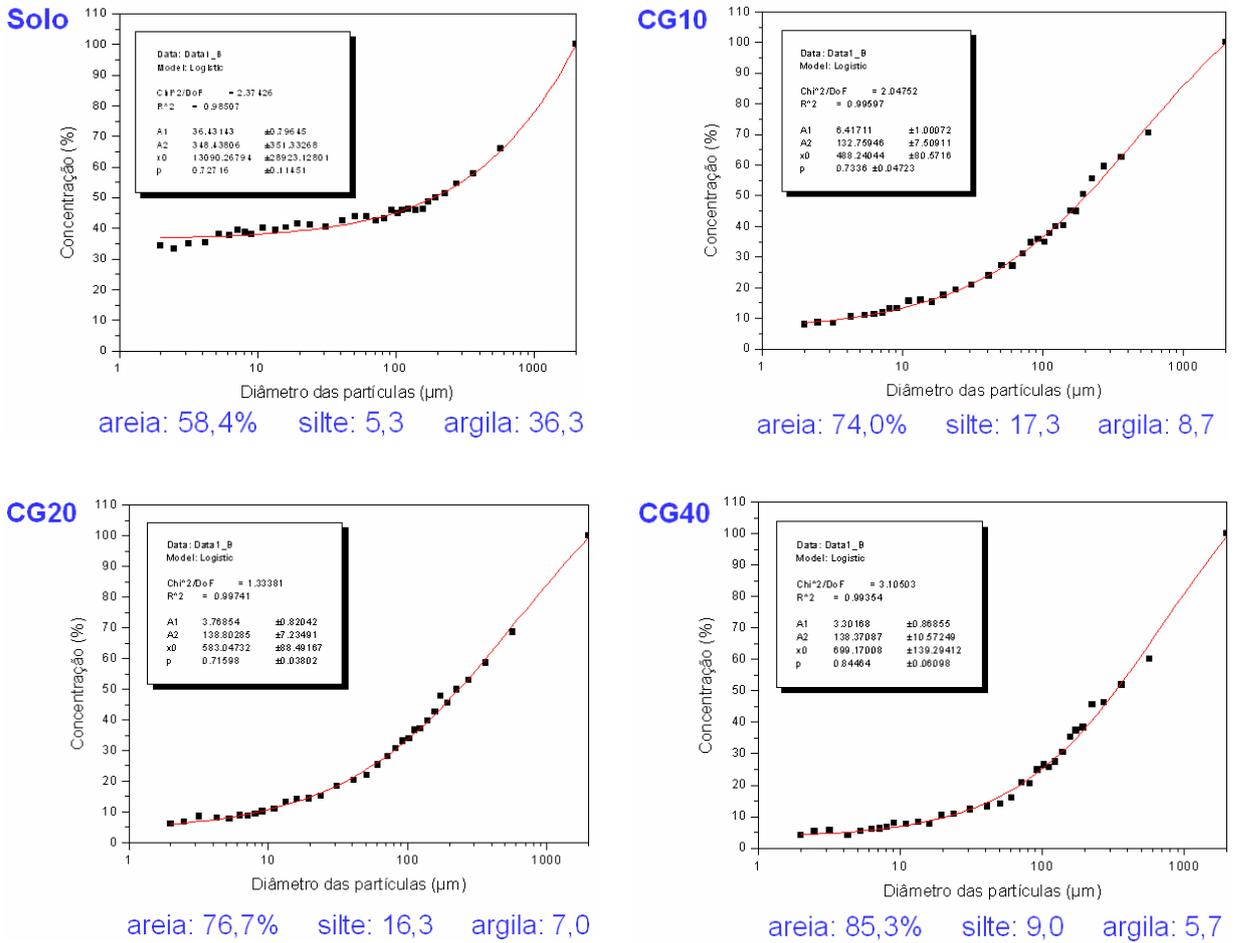


Figura 23 - Curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos CG10, CG20 e CG40

As curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40 são mostradas na Figura 24.

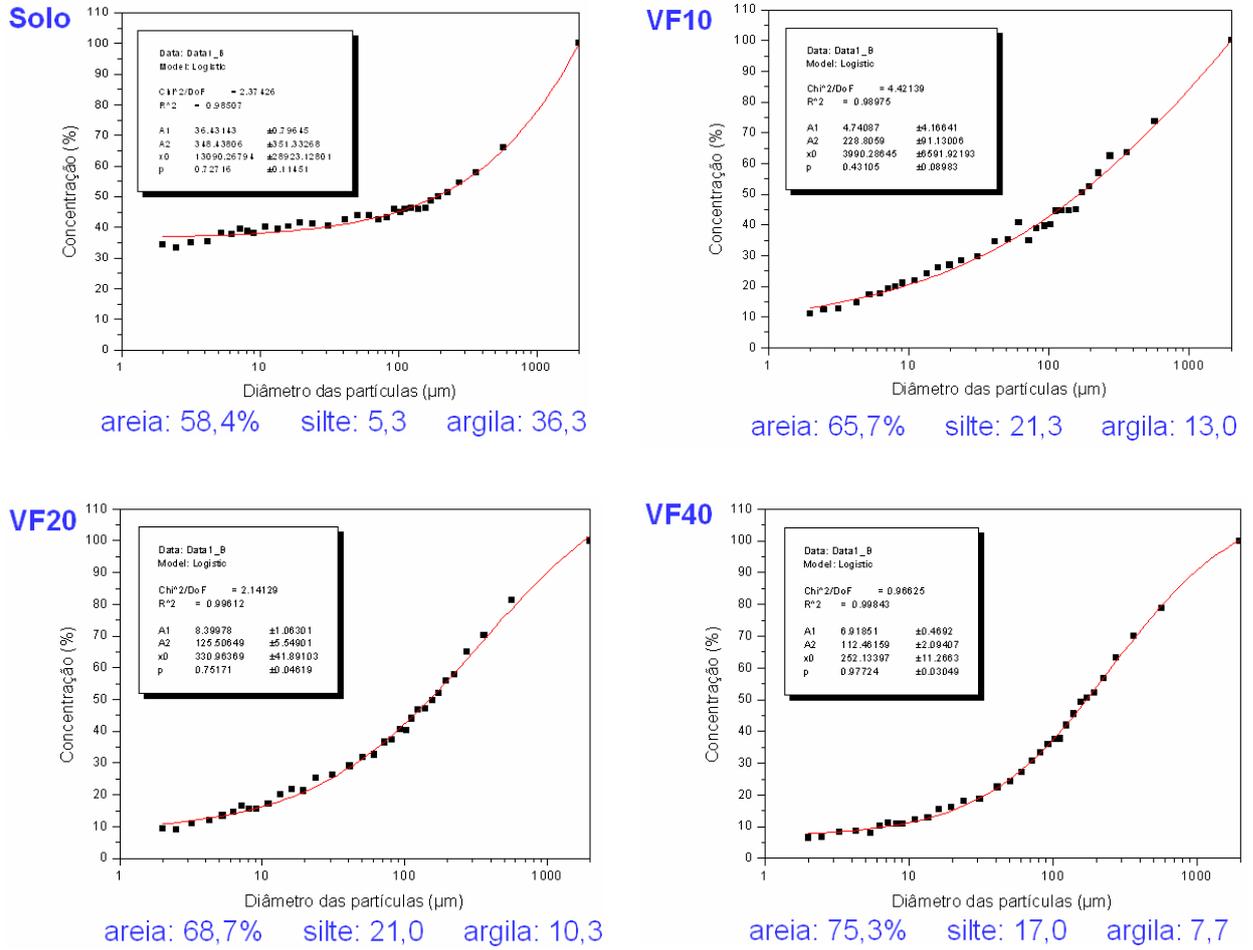


Figura 24 - Curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40

As curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40 são mostradas na Figura 25.

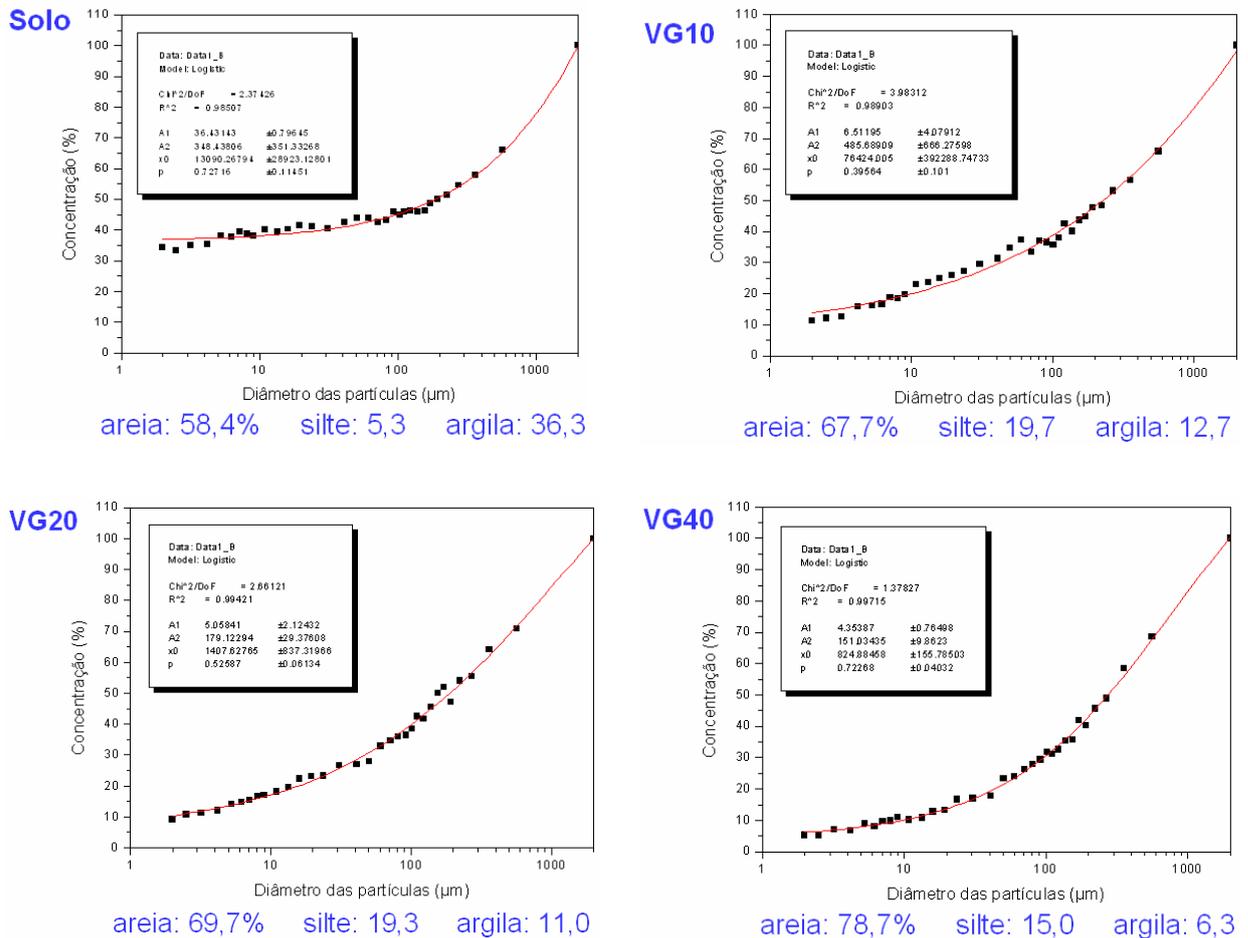


Figura 25 - Curvas da distribuição granulométrica do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40

Todos os pontos experimentais de distribuição granulométrica mostrados nas Figuras 21, 22, 23, 24 e 25 foram ajustados por curvas sigmoidais, com auxílio do software Origin, versão 6.1.

A Tabela 21 apresenta as porcentagens das frações granulométricas 2mm a 50µm, 50 a 2µm e abaixo de 2µm obtidas dos gráficos apresentados na Figura 21.

Tabela 21 - Frações granulométricas 2mm a 50 $\mu$ m (areia), 50 a 2 $\mu$ m (silte) e abaixo de 2 $\mu$ m (argila) obtidas para os RCD-R dos tipos CF, CG, VF e VG

<b>Frações</b>	<b>2mm a 50<math>\mu</math>m (%)</b>	<b>50 a 2<math>\mu</math>m (%)</b>	<b>&lt; 2<math>\mu</math>m (%)</b>
<b>CF</b>	77,5	14,4	8,1
<b>CG</b>	84,0	5,8	10,2
<b>VF</b>	66,6	21,3	12,1
<b>VG</b>	79,3	9,7	11,0

A Tabela 22 apresenta as porcentagens das frações granulométricas areia (2mm a 50 $\mu$ m), silte (50 a 2 $\mu$ m) e argila (abaixo de 2 $\mu$ m) obtidas dos gráficos apresentados nas Figuras 22 a 25 para os solos dos vasos dos seguintes tratamentos: solo natural, CF10, CF20, CF40, CG10, CG20, CG40, VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40.

Tabela 22 - Frações granulométricas areia, silte e argila obtidas para os solos dos vasos dos seguintes tratamentos: solo natural, CF10, CF20, CF40, CG10, CG20, CG40, VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40

<b>Frações</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Argila (%)</b>
<b>Solo natural</b>	58,4	5,3	36,3
<b>CF10</b>	76,0	16,0	8,0
<b>CF20</b>	80,3	14,3	5,3
<b>CF40</b>	77,7	16,0	6,3
<b>CG10</b>	74,0	17,3	8,7
<b>CG20</b>	76,7	16,3	7,0
<b>CG40</b>	85,3	9,0	5,7
<b>VF10</b>	65,7	21,3	13,0
<b>VF20</b>	68,7	21,0	10,3
<b>VF40</b>	75,3	17,0	7,7
<b>VG10</b>	67,7	19,7	12,7
<b>VG20</b>	69,7	19,3	11,0
<b>VG40</b>	78,7	15,0	6,3

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 21, os RCD-R dos tipos CF, CG, VF e VG apresentaram textura bastante arenosa, sendo que a diferença entre os RCD-R finos e os grossos está, principalmente, nas frações equivalentes à areia e silte, ou seja, a moagem adicional para produzir CF e VF, praticamente, converteu areia em silte, alterando muito pouco a fração equivalente à argila.

O material VF se destaca dos demais, sendo o que apresenta menor percentual da fração 2mm a 50 $\mu$ m (areia) e maiores percentuais das frações 50 a 2 $\mu$ m (silte) e abaixo de 2 $\mu$ m (argila).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 22, o solo natural apresentou textura média (franco argilo arenosa). Com a aplicação das elevadas doses de RCD-R, o solo natural teve sua composição granulométrica bastante alterada no sentido de torná-la mais arenosa, elevando a fração areia e reduzindo a fração argila. Em geral, este efeito ocorreu tanto mais quanto maior a dose do RCD-R utilizada.

#### **4.3.3 Análise química de fertilidade do solo**

A Tabela 23 apresenta um resumo dos resultados da análise química de fertilidade das três amostragens (A, B e C) do solo dos vasos com os seguintes tratamentos: solo natural, CF10, CF20, CF40, CG10, CG20, CG40, VF10, VF20, VF40, VG10, VG20, VG40, V% 60 e V% 80, conforme metodologia descrita nos itens 3.3.2 e 3.3.3.

Tabela 23 - Resultados da análise química de fertilidade do solo das amostragens A, B e C dos vasos com os tratamentos: solo natural, CF10, CF20, CF40, CG10, CG20, CG40, VF10, VF20, VF40, VG10, VG20, VG40, V% 60 e V% 80

Tratamento	pH CaCl <sub>2</sub>			K			Ca			Mg		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
				mmolc/dm <sup>3</sup>			mmolc/dm <sup>3</sup>			mmolc/dm <sup>3</sup>		
1 - Solo natural	4,7	4,9	4,2	1	3	12	7	21	18	3	8	5
2 - CF 10	7,6	7,3	7,6	1	2	1	302	232	244	4	11	7
3 - CF 20	7,9	7,6	7,6	2	3	3	402	277	318	8	13	7
4 - CF 40	8,0	7,6	7,7	3	7	11	600	375	252	19	19	10
5 - CG 10	7,8	7,4	7,5	1	4	2	347	241	217	8	12	6
6 - CG 20	7,9	7,5	7,5	2	2	2	482	293	388	15	16	6
7 - CG 40	8,1	7,7	7,7	3	8	3	837	518	397	29	26	12
8 - VF 10	7,6	7,4	6,9	1	7	1	138	147	70	17	17	12
9 - VF 20	7,6	7,4	7,4	1	7	2	170	166	140	19	16	10
10 - VF 40	7,7	7,6	7,6	2	4	2	263	240	268	28	23	14
11 - VG 10	7,4	7,4	6,7	1	5	1	112	109	84	19	17	14
12 - VG 20	7,4	7,5	7,1	2	4	1	207	170	153	22	21	15
13 - VG 40	7,6	7,6	7,5	2	5	2	310	261	291	37	30	18
14 - V% 60	5,9	5,8	4,4	1	5	13	20	31	24	11	11	10
15 - V% 80	6,2	6,2	6,2	1	2	7	28	36	16	17	17	6

Tratamento	H + Al			CTC			S			V%		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
	mmolc/dm <sup>3</sup>			mmolc/dm <sup>3</sup>			mmolc/dm <sup>3</sup>			%		
1 - Solo natural	29	37	43	40	69	78	11	32	35	28	46	45
2 - CF 10	7	11	8	314	256	260	307	245	252	98	96	97
3 - CF 20	6	9	8	418	302	336	412	293	328	99	97	98
4 - CF 40	5	7	7	627	408	280	622	401	273	99	98	98
5 - CG 10	7	8	8	363	265	233	356	257	225	98	97	97
6 - CG 20	6	7	8	505	318	404	499	311	396	99	98	98
7 - CG 40	6	8	7	875	560	419	869	552	412	99	99	98
8 - VF 10	8	9	12	164	180	95	156	171	83	95	95	87
9 - VF 20	8	9	8	198	198	160	190	189	152	96	95	95
10 - VF 40	8	9	8	301	276	292	293	267	284	97	97	97
11 - VG 10	9	10	12	141	141	111	132	131	99	94	93	89
12 - VG 20	8	11	9	239	206	178	231	195	169	97	95	95
13 - VG 40	8	8	8	357	304	319	349	296	311	98	97	97
14 - V% 60	21	27	41	53	74	88	32	47	47	60	64	53
15 - V% 80	18	21	35	64	76	64	46	55	29	72	72	45

A Tabela 24 apresenta os valores de pH, soma de bases (S) e CTC do solo do fundo dos vasos com os tratamentos CF40, CG40, VF40 e VG40, referente à terceira amostragem (C).

Tabela 24 – pH, soma de bases (S) e CTC do solo do fundo dos vasos com os tratamentos CF40, CG40, VF40 e VG40, referente à amostragem C.

	pH	S	CTC
	mmolc/dm <sup>3</sup>		
4 - CF 40	7,7	495	502
7 - CG 40	7,9	480	488
10 - VF 40	7,7	252	260
13 - VG 40	7,7	271	279

Para melhor compreensão da análise a seguir, são dadas abaixo as relações que definem matematicamente a Soma de Bases Trocáveis (S), a Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e a Saturação por Bases (V%).

$$S = K + Ca + Mg \quad (30)$$

$$CTC = S + (H + Al) \quad (31)$$

$$V\% = 100 S/CTC = 100 [1 - (H + Al)/CTC] \quad (32)$$

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 23, o RCD-R vermelho e, principalmente, o cinza foram eficazes em neutralizar a acidez do solo natural que, originalmente, era bastante ácido (pH de 4,2 a 4,9), superando a ação da calagem convencional com calcário, nos dois níveis de saturação por bases utilizados (V%=60 e V%=80). Entretanto, observou-se que as doses de RCD-R aplicadas foram muito altas, a ponto de alcalinizar ligeiramente o solo.

Com as altas doses de RCD-R aplicadas, observou-se que o vermelho e, principalmente, o cinza elevaram significativamente as concentrações das bases  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , aumentando, portanto, a soma de bases (S) e a CTC, superando em muito a ação da calagem convencional com calcário nos dois níveis utilizados. Por exemplo, para a amostragem B, a CTC do tratamento CG10 foi 284% maior que a do solo natural e 249% maior que a do tratamento V% 80. Esse efeito de elevação da CTC e do pH de um solo ácido e de baixa fertilidade com a adição de RCD-R está de acordo com o que já havia sido observado por Ramalho e Pires (2009).

O RCD-R vermelho e, principalmente, o cinza, nas doses aplicadas, foram também mais eficazes que a calagem convencional com calcário em reduzir a concentração dos íons H+Al, elevando assim a saturação por bases (V%).

Os RCD-R cinzas foram mais eficientes que os vermelhos (mesmo acrescidos de calcário a V%=80) na elevação da CTC e redução da concentração dos íons H+Al e, portanto, no aumento da saturação por bases (V%), considerando as mesmas granulometrias e doses. Isso está coerente com os resultados da análise química preliminar apresentados no item 4.1.2.

Em geral, os RCD-R grossos foram mais eficientes que os finos (dos mesmos tipos e doses) na elevação da CTC, mantendo, aproximadamente, as mesmas concentrações dos íons H+Al (Tabela 23).

Dessa forma, o RCD-R que apresentou melhor desempenho quanto à fertilidade do solo foi o cinza grosso (CG). O CF apresentou um desempenho inferior ao CG provavelmente porque lixiviou mais que este. Segundo os resultados apresentados na Tabela 24, a CTC de fundo de vaso do tratamento CF40, na amostragem C, foi 80% maior que a da camada 3-5 cm enquanto que a CTC de fundo de vaso do tratamento CG40 foi apenas 16% maior que a da camada 3-5 cm. Isso evidencia o fato de que o material CF migrou, se concentrando no fundo do vaso.

Os RCD-R vermelhos, tanto VF como o VG não lixiviaram. Provavelmente foram mais bem agregados ao solo. Uma hipótese para explicar este efeito é que a maior presença de ferro e alumínio nos RCD-R vermelhos tenha funcionado como agente cimentante, favorecendo a formação de agregados mais estáveis e estabilizando o próprio RCD-R vermelho no perfil do solo.

Analisando os valores da saturação por bases (V%) ao longo dos 14 meses que separam a amostragem A da C, é possível concluir que o efeito residual dos RCD-R, principalmente do cinza, foi maior que o da calagem convencional com calcário, nas doses aplicadas. Por exemplo, enquanto a V% do tratamento CG10 caiu de 98% para 97% em 14 meses, a do tratamento com calcário a V% 80 caiu de 72% para 45%. Isso significa que os tratamentos com calcário já precisariam de nova calagem enquanto os tratamentos com RCD-R estavam muito longe disso. Esse efeito deve estar relacionado às altas doses de RCD-R aplicadas que demoraram mais tempo para serem consumidas, mas também à granulometria mais grosseira, principalmente do CG que, tendo uma menor reatividade, proporcionou uma liberação mais lenta e prolongada das bases trocáveis.

#### **4.3.4 Curvas características de retenção de água (CR)**

As Figuras 26 e 27 apresentam as curvas características de retenção de água, obtidas conforme metodologia descrita no item 3.3.3, do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40, referentes à

primeira amostragem (A). São mostrados tanto os valores medidos, como a curva ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980).

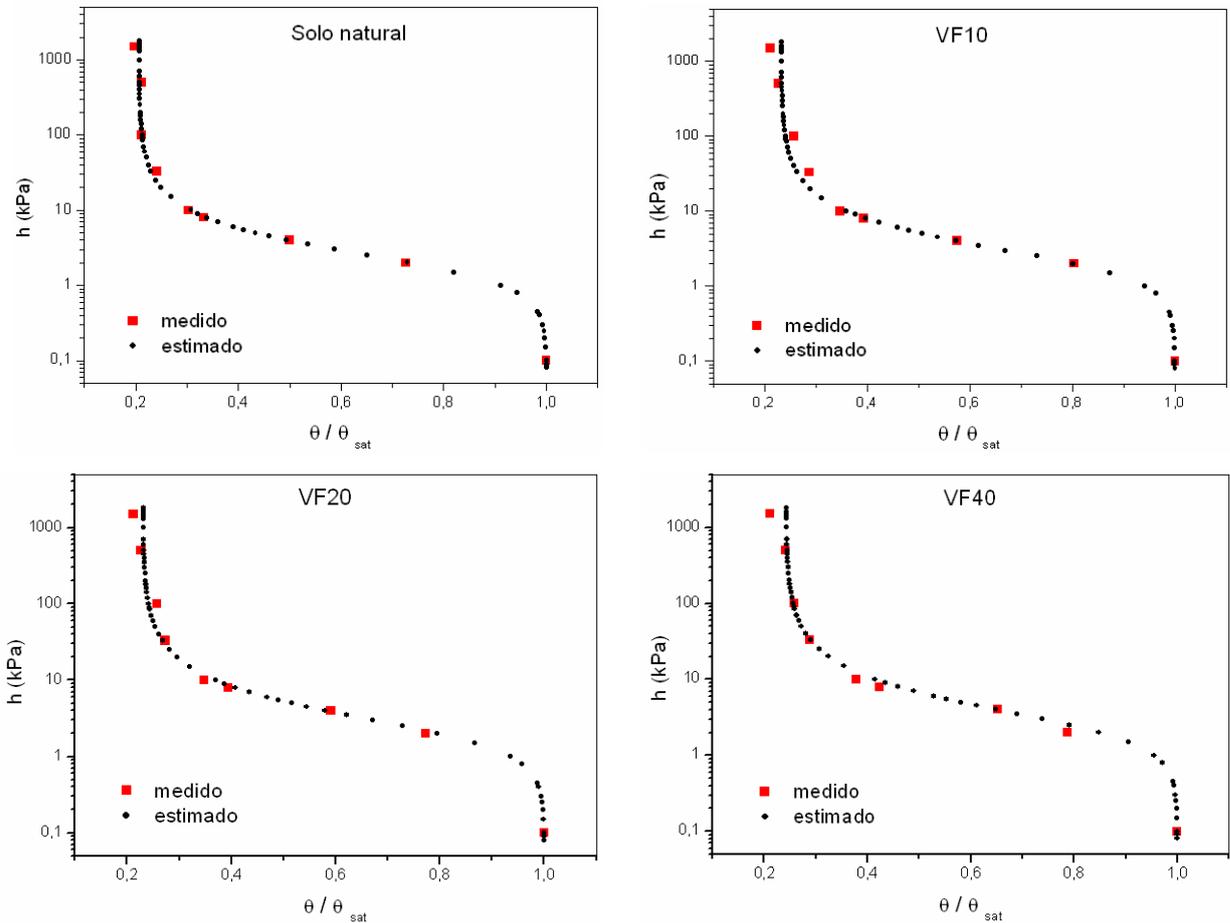


Figura 26 - Curvas características de retenção de água, medida e ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40, referentes à amostragem A

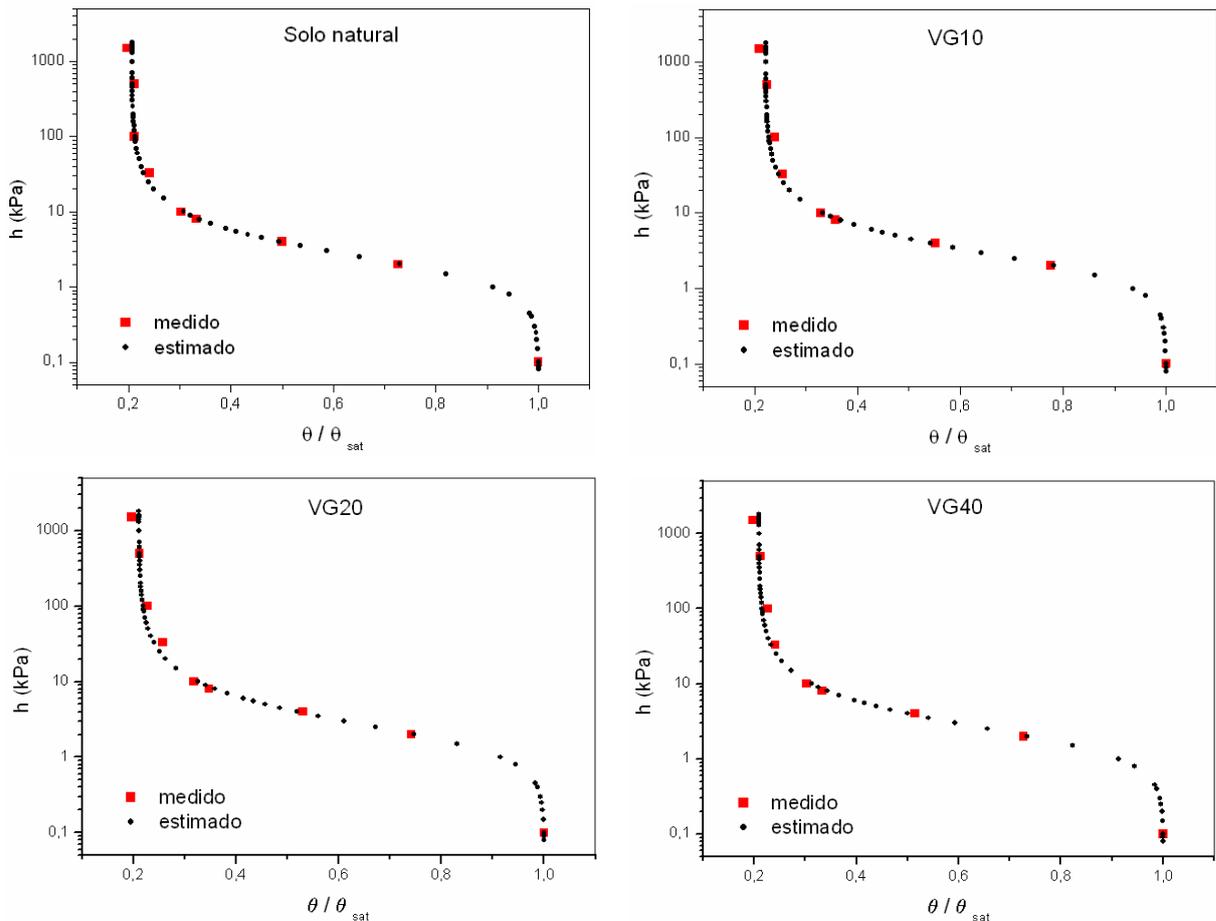


Figura 27 - Curvas características de retenção de água, medida e ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40, referentes à amostragem A

A Tabela 25 apresenta os valores dos parâmetros de ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980) para o solo natural e para os solos dos tratamentos VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40, referentes à amostragem A.

Tabela 25 - Valores dos parâmetros de ajuste ao modelo de van Genuchten (1980) para o solo natural e para os solos dos tratamentos VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40, referentes à amostragem A

Tratamento	$\alpha$	n	m	$\theta$ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	
				$\theta_{sat}$	$\theta_{res}$
Solo natural	0,529	2,227	0,551	0,660	0,136
VF10	0,435	2,210	0,548	0,660	0,154
VF20	0,449	2,121	0,529	0,650	0,150
VF40	0,371	2,105	0,525	0,630	0,153
VG10	0,454	2,276	0,561	0,670	0,149
VG20	0,513	2,167	0,539	0,660	0,139
VG40	0,524	2,223	0,550	0,660	0,138

Um comparativo entre as curvas de retenção de água do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40, para a amostragem A, é mostrado na Figura 28.

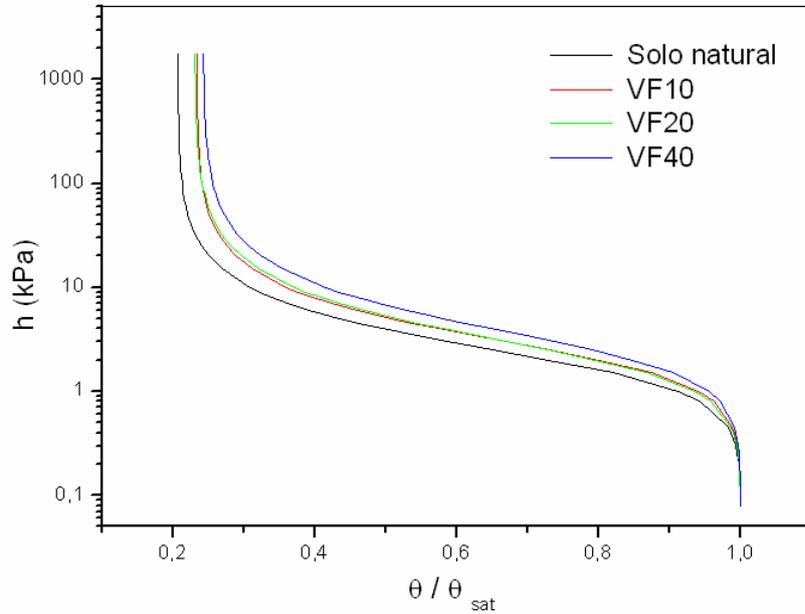


Figura 28 - Curvas de retenção de água, ajustadas, do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40, para a amostragem A

Um comparativo entre as curvas de retenção de água do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40, para a amostragem A, é mostrado na Figura 29.

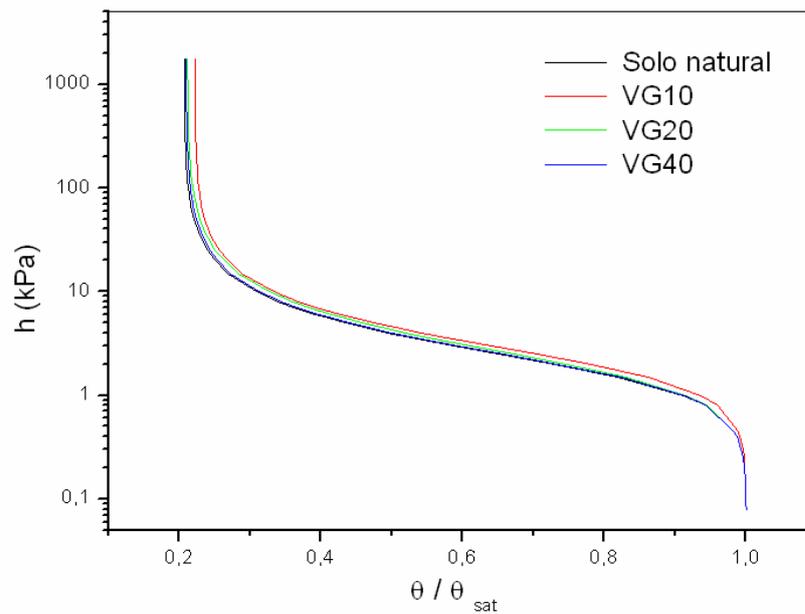


Figura 29 - Curvas de retenção de água, ajustadas, do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40, para a amostragem A

As Figuras 30 e 31 apresentam as curvas características de retenção de água, obtidas conforme metodologia descrita no item 3.3.3, do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40, referentes à segunda amostragem (B). São mostrados tanto os valores medidos, como a curva ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980).

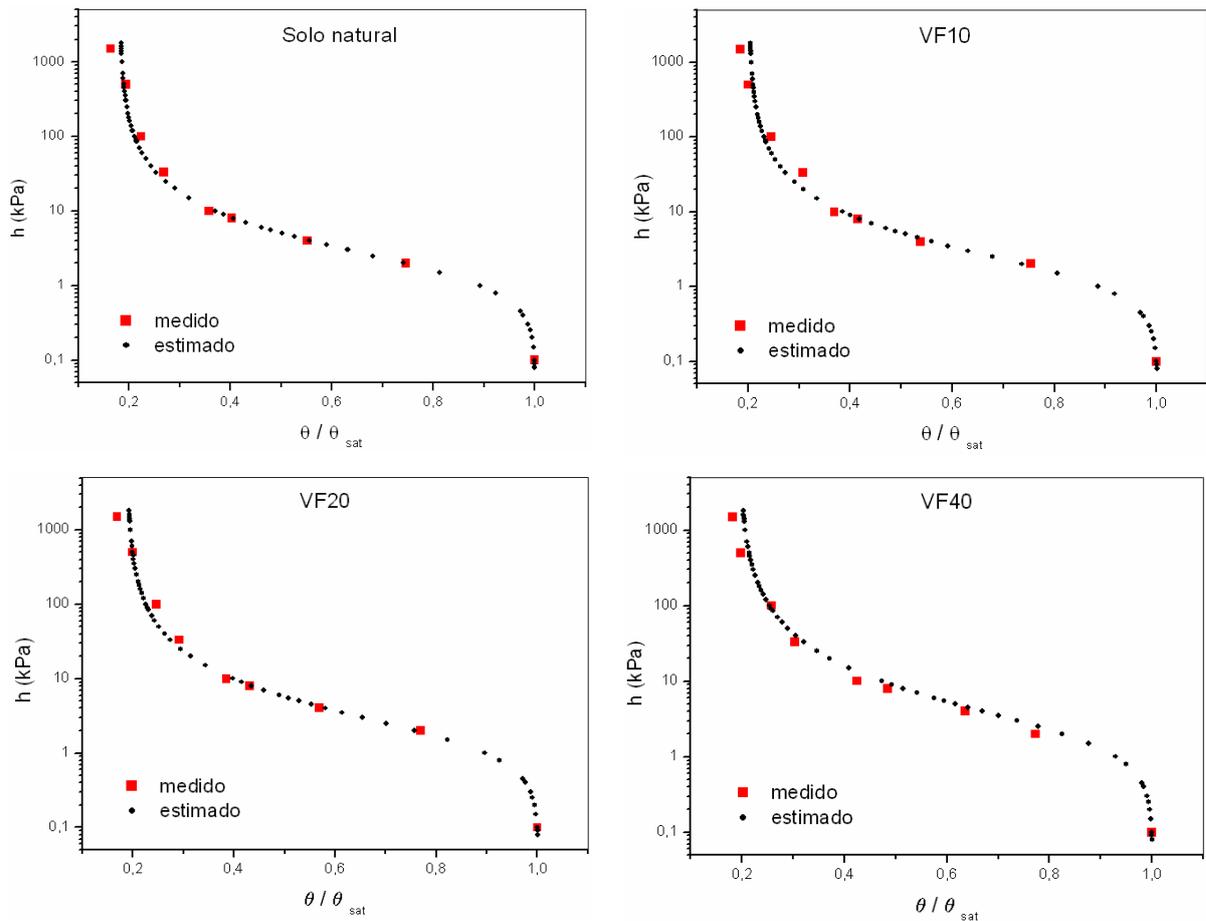


Figura 30 - Curvas características de retenção de água, medida e ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40, referentes à amostragem B

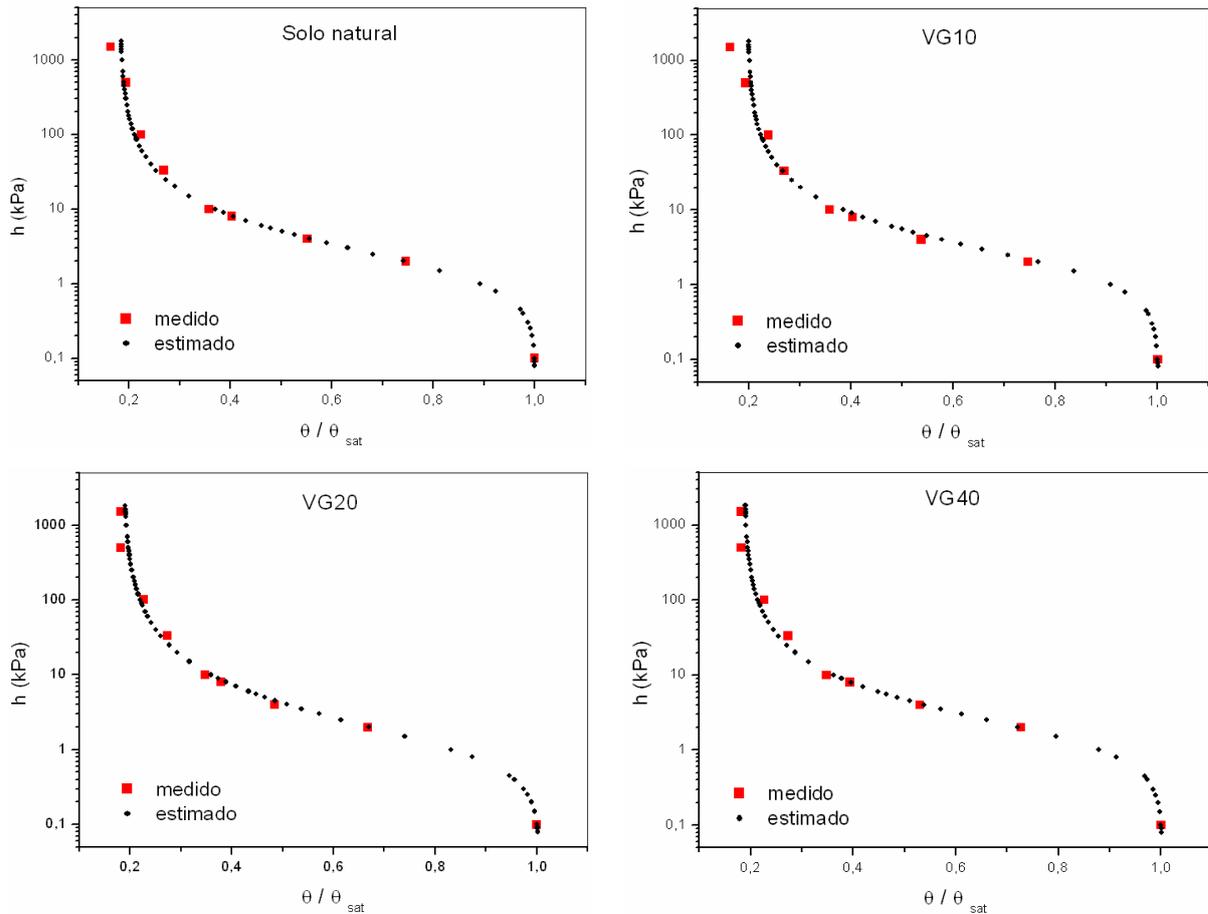


Figura 31 - Curvas características de retenção de água, medida e ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40, referentes à amostragem B.

A Tabela 26 apresenta os valores dos parâmetros de ajuste pelo modelo de van Genuchten (1980) para o solo natural e para os solos dos tratamentos VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40, referentes à amostragem B.

Tabela 26 - Valores dos parâmetros de ajuste ao modelo de van Genuchten (1980) para o solo natural e para os solos dos tratamentos VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40, referentes à amostragem B

Tratamento	$\alpha$	n	m	$\theta_{sat} \quad \theta_{res}$ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	
Solo natural	0,586	1,822	0,451	0,670	0,122
VF10	0,623	1,797	0,444	0,650	0,131
VF20	0,580	1,761	0,432	0,650	0,122
VF40	0,449	1,688	0,408	0,620	0,121
VG10	0,529	1,862	0,463	0,640	0,126
VG20	0,859	1,717	0,418	0,650	0,121
VG40	0,635	1,825	0,452	0,660	0,123

Um comparativo entre as curvas de retenção de água do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40, para a amostragem B, é mostrado na Figura 32.

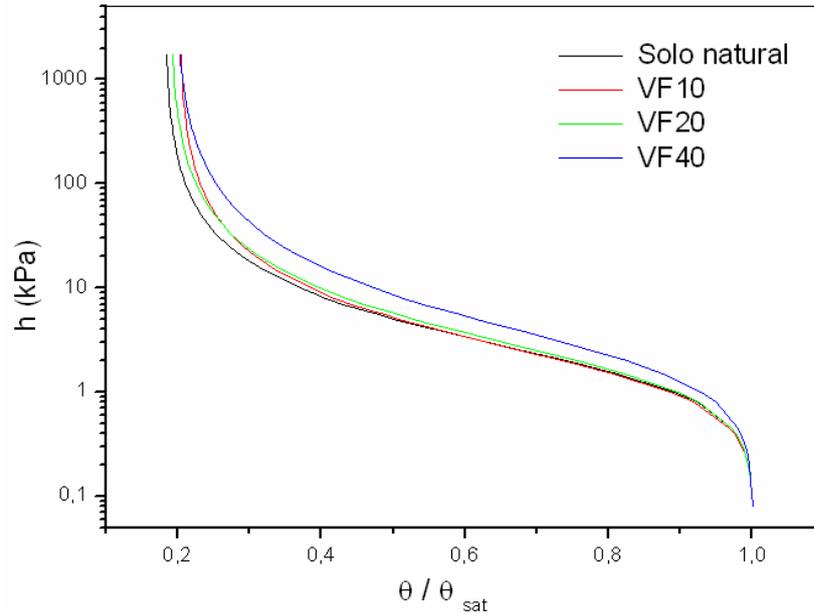


Figura 32 - Curvas de retenção de água, ajustadas, do solo natural e dos solos dos tratamentos VF10, VF20 e VF40, para a amostragem B

Um comparativo entre as curvas de retenção de água do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40, para a amostragem B, é mostrado na Figura 33.

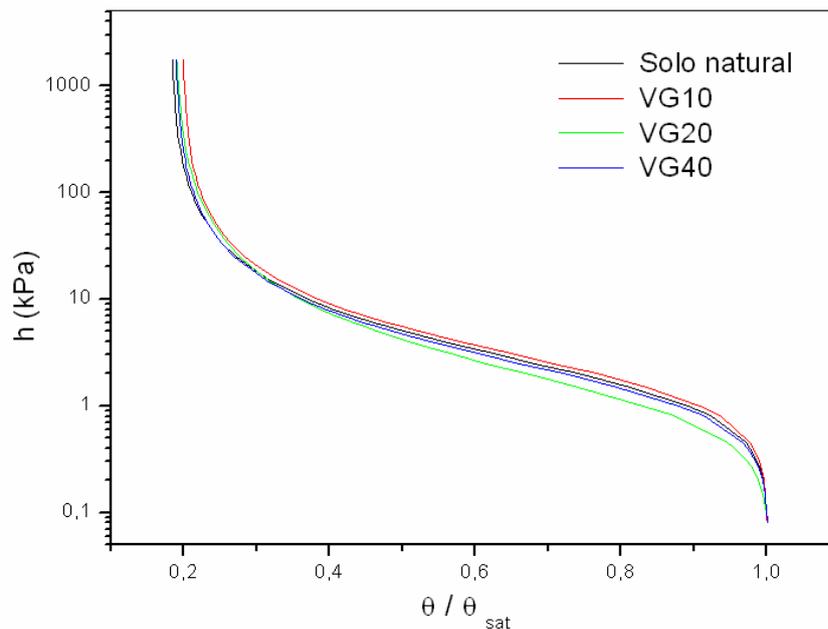


Figura 33 - Curvas de retenção de água, ajustadas, do solo natural e dos solos dos tratamentos VG10, VG20 e VG40, para a amostragem B

As Tabelas 27 e 28 apresentam, respectivamente, para as amostragens A e B, os valores de porosidade total, microporosidade (8kPa), macroporosidade, capacidade de campo (CC) (10kPa), ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (10kPa) e densidade, obtidos de amostras indeformadas do solo dos vasos dos tratamentos com RCD-R vermelho, por meio da curva característica de retenção de água, conforme metodologia descrita no item 3.3.3.

Tabela 27 – Resultados obtidos por meio da curva característica de retenção de água de amostras indeformadas do solo dos vasos dos tratamentos com RCD-R vermelho, referentes à amostragem A

Tratamento	Porosidade total	Microporosidade	Macroporosidade	CC	PMP	Água disponível	Densidade
		8kPa		10kPa		10kPa	
		m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>					Mg m <sup>-3</sup>
<b>Solo natural</b>	0,66 ± 0,01	0,22 ± 0,01	0,44 ± 0,01	0,20 ± 0,00	0,13 ± 0,01	0,07 ± 0,01	1,15 ± 0,05
<b>VF10</b>	0,66 ± 0,02	0,26 ± 0,01	0,40 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,09 ± 0,01	1,32 ± 0,03
<b>VF20</b>	0,65 ± 0,02	0,26 ± 0,00	0,40 ± 0,02	0,23 ± 0,02	0,14 ± 0,01	0,09 ± 0,00	1,30 ± 0,08
<b>VF40</b>	0,63 ± 0,02	0,28 ± 0,01	0,34 ± 0,02	0,25 ± 0,01	0,14 ± 0,00	0,11 ± 0,01	1,41 ± 0,03
<b>VG10</b>	0,67 ± 0,02	0,24 ± 0,02	0,43 ± 0,01	0,22 ± 0,02	0,14 ± 0,01	0,08 ± 0,01	1,25 ± 0,08
<b>VG20</b>	0,66 ± 0,02	0,23 ± 0,02	0,43 ± 0,00	0,21 ± 0,01	0,13 ± 0,01	0,08 ± 0,01	1,23 ± 0,06
<b>VG40</b>	0,66 ± 0,03	0,22 ± 0,01	0,43 ± 0,02	0,20 ± 0,01	0,13 ± 0,01	0,07 ± 0,01	1,23 ± 0,03

Tabela 28 – Resultados obtidos por meio da curva característica de retenção de água de amostras indeformadas do solo dos vasos dos tratamentos com RCD-R vermelho, referentes à amostragem B

Tratamento	Porosidade total	Microporosidade	Macroporosidade	CC	PMP	Água disponível	Densidade
		8kPa		10kPa		10kPa	
		m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>					Mg m <sup>-3</sup>
<b>Solo natural</b>	0,67 ± 0,02	0,27 ± 0,00	0,40 ± 0,02	0,24 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,13 ± 0,01	1,23 ± 0,02
<b>VF10</b>	0,65 ± 0,03	0,27 ± 0,00	0,39 ± 0,03	0,24 ± 0,01	0,12 ± 0,00	0,12 ± 0,01	1,29 ± 0,02
<b>VF20</b>	0,65 ± 0,02	0,28 ± 0,01	0,37 ± 0,03	0,25 ± 0,01	0,11 ± 0,02	0,14 ± 0,03	1,32 ± 0,03
<b>VF40</b>	0,62 ± 0,02	0,32 ± 0,06	0,30 ± 0,07	0,28 ± 0,02	0,12 ± 0,00	0,16 ± 0,02	1,42 ± 0,17
<b>VG10</b>	0,64 ± 0,03	0,27 ± 0,05	0,38 ± 0,07	0,24 ± 0,04	0,11 ± 0,01	0,13 ± 0,03	1,29 ± 0,10
<b>VG20</b>	0,65 ± 0,06	0,25 ± 0,01	0,40 ± 0,07	0,23 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,11 ± 0,01	1,23 ± 0,04
<b>VG40</b>	0,66 ± 0,03	0,26 ± 0,03	0,40 ± 0,06	0,23 ± 0,03	0,12 ± 0,01	0,11 ± 0,02	1,30 ± 0,09

As curvas de retenção de água apresentadas nas Figuras 28 e 32 deixam claro que os RCD-R do tipo VF contribuíram para um significativo aumento da capacidade de retenção de água, de forma progressiva com a dose aplicada, sendo que o tratamento VF40 se destacou dos demais, tanto nos resultados referentes à

amostragem A, como à B. Isto está coerente com os resultados preliminares apresentados na Figura 18 que mostraram que o efeito no aumento da capacidade de retenção de água proporcionado pelo RCD-R vermelho é dependente da dose, de forma direta.

Os RCD-R do tipo VG, por outro lado, não apresentaram efeitos significativos quanto ao aumento da capacidade de retenção de água, de acordo com as curvas de retenção de água apresentadas nas Figuras 29 e 33.

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 27 e 28, verifica-se que, para os tratamentos com os RCD-R do tipo VF, a microporosidade do solo aumenta, enquanto a macroporosidade diminui com o aumento da dose. Provavelmente, a granulometria mais fina desse RCD-R, que certamente apresenta maior superfície específica, deve ter favorecido a formação de agregados, estruturando melhor o solo e privilegiando a microporosidade intra-agregado, em detrimento da macroporosidade inter-agregado. Esse aumento da microporosidade com a dose de VF justifica o aumento da capacidade de retenção e da água disponível (CAD) desses tratamentos, também com o aumento da dose.

Por outro lado, os tratamentos com os RCD-R do tipo VG não apresentaram variações significativas nem da macro, nem da microporosidade e nem da CAD com a dose aplicada.

Comparando-se os valores das porosidades obtidas entre as amostragens A e B, de todos os tratamentos, verifica-se que, no período de sete meses que as separam, houve uma estruturação dos solos em todos os tratamentos, pois as microporosidades aumentaram e as macroporosidades diminuíram, com o conseqüente aumento das CADs para todos os tratamentos. No entanto, em ambas as amostragens, o tratamento VF40 continua se destacando como o que apresentou os maiores valores de microporosidade e CAD.

#### **4.3.5 Microtomografia computadorizada de raios X (Micro TC)**

As Figuras 34 e 35 mostram imagens de cortes microtomográficos obtidos de amostras indeformadas do solo dos vasos dos tratamentos com RCD-R vermelho, nas amostragens A e B, respectivamente, conforme metodologia descrita no item 3.3.5.

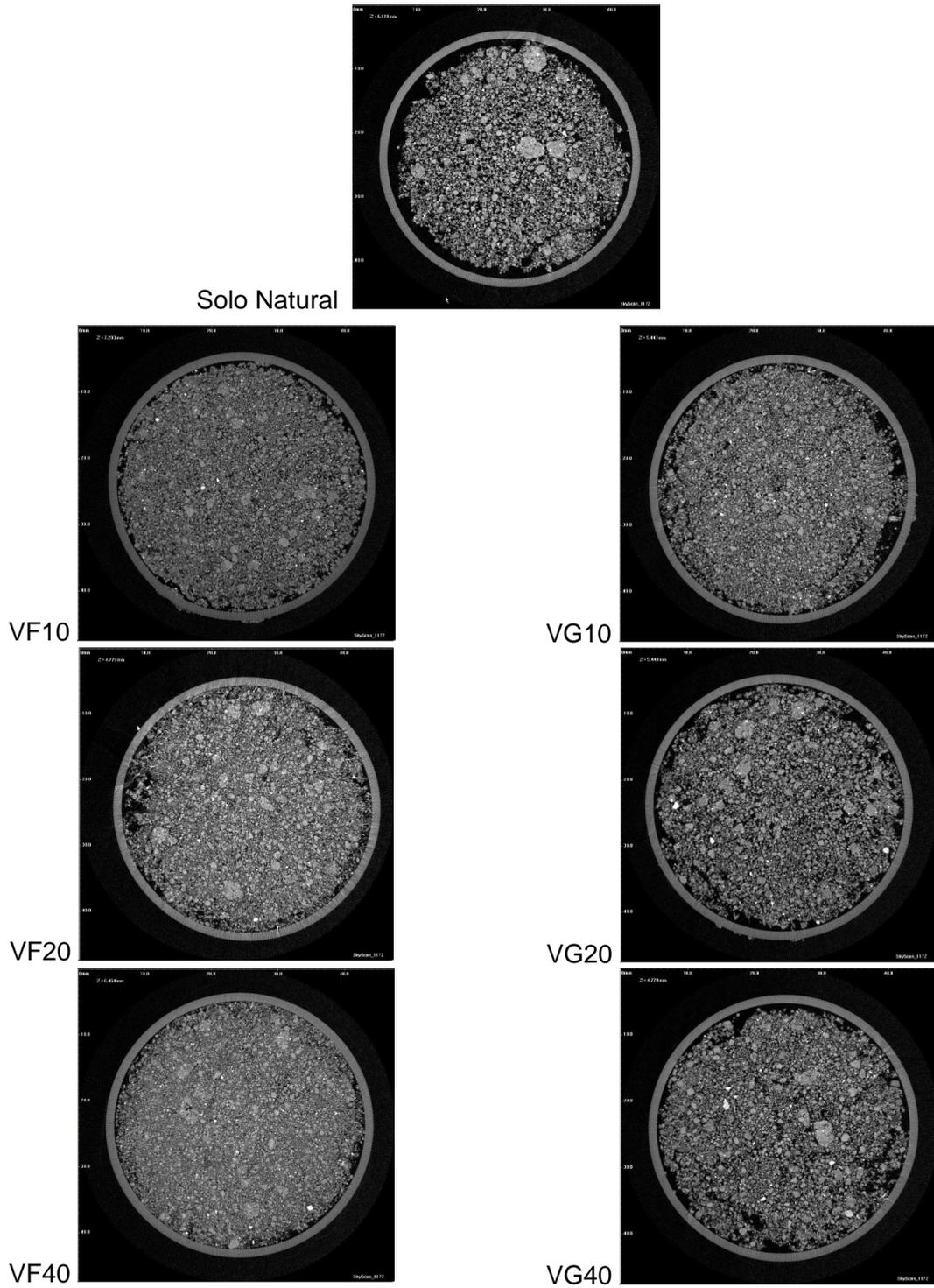


Figura 34 - Cortes microtomográficos referentes à primeira amostragem (A) do solo dos tratamentos solo natural, VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40

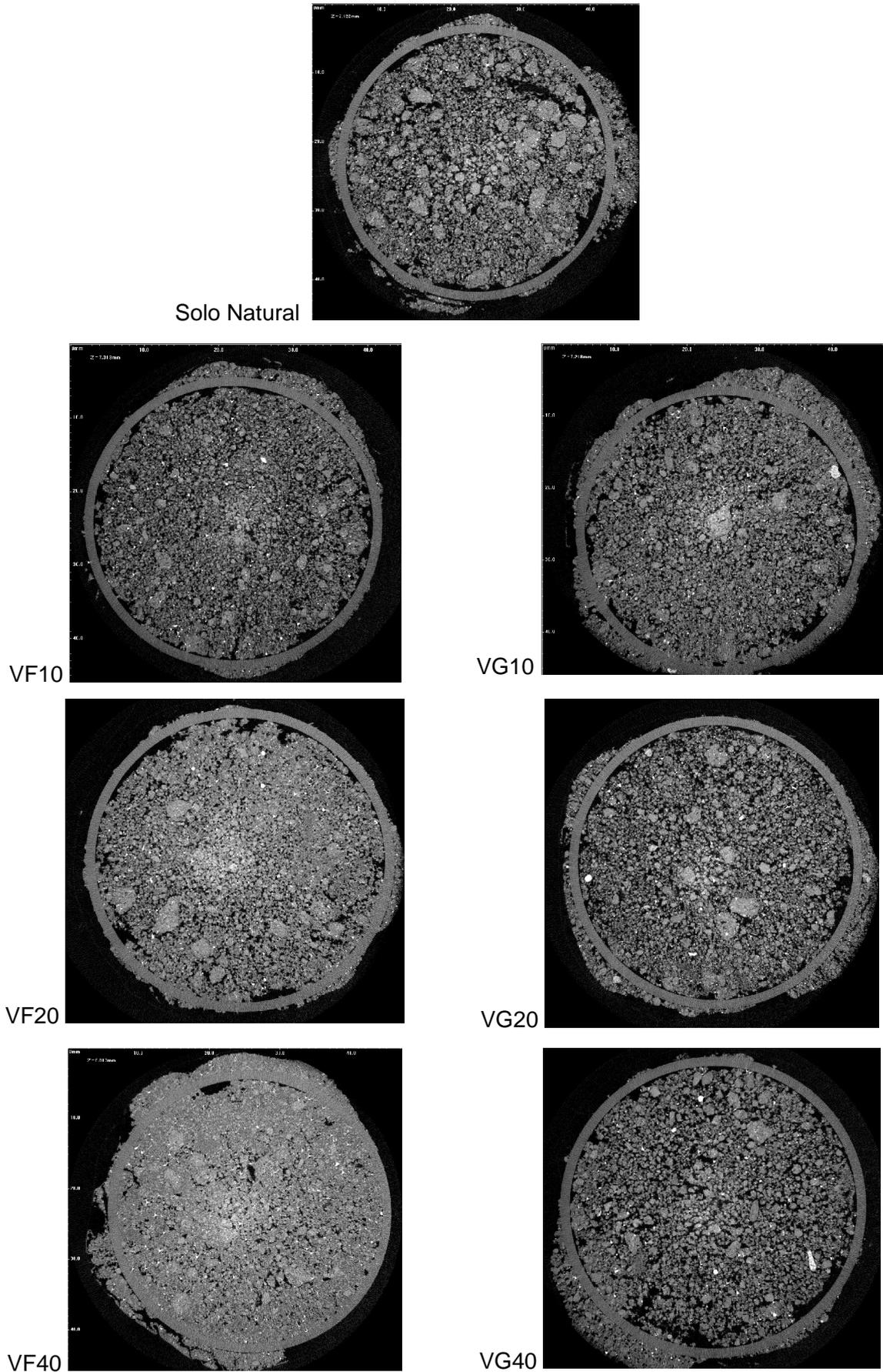


Figura 35 - Cortes microtomográficos referentes à segunda amostragem (B) do solo dos tratamentos solo natural, VF10, VF20, VF40, VG10, VG20 e VG40

As imagens da Figura 34, dos solos coletados com apenas 35 dias de incubação, mostram que esses solos ainda estão bastante desestruturados, com pouca formação de agregados, devido ao peneiramento pelo qual o solo e os RCD-R passaram antes da montagem dos vasos. Comparando as imagens das Figuras 34 e 35 observou-se que, no período de sete meses, entre as amostragens A e B, houve uma estruturação dos solos tanto para os tratamentos com VF como com VG, apresentando um aumento da microporosidade e redução da macroporosidade. Em especial, para os tratamentos com VF, observou-se a formação de macro-agregados, potencializada pela presença de ferro e alumínio, de modo a elevar a microporosidade intra-agregado desses solos. Isso está coerente com o aumento da capacidade de retenção de água apresentada por esses tratamentos com os RCD-R do tipo VF, em especial, o VF40.

A Tabela 29 apresenta os valores de porosidade obtidos por meio do *software* CtAn para os tratamentos com o RCD-R vermelho para as duas amostragens (A e B). Uma vez que a resolução (tamanho do voxel) utilizada na aquisição das imagens foi de 12 $\mu$ m, esta porosidade obtida por microTC contabilizará, teoricamente, apenas poros com diâmetros equivalentes superiores a 24 $\mu$ m (duas vezes o tamanho do voxel) aproximadamente, o que equivale a meso e macroporos.

Tabela 29 – Porosidades obtidas por microTC para os tratamentos com os RCD-R vermelhos

<b>Tratamento</b>	<b>Porosidades para Amostragem A (%)</b>	<b>Porosidades para Amostragem B (%)</b>
Solo Natural	24,5 $\pm$ 3,1	27,3 $\pm$ 5,0
VF10	16,6 $\pm$ 3,6	22,6 $\pm$ 4,4
VF20	15,3 $\pm$ 0,8	19,1 $\pm$ 3,0
VF40	10,2 $\pm$ 2,8	12,5 $\pm$ 3,9
VG10	18,7 $\pm$ 2,5	25,4 $\pm$ 5,4
VG20	22,4 $\pm$ 4,9	28,9 $\pm$ 3,9
VG40	25,2 $\pm$ 2,7	30,9 $\pm$ 1,1

As Tabelas 30 e 31 apresentam um comparativo entre os valores de porosidade total, micro e macroporosidade obtidas pelo método da curva de retenção (CR) e os valores de porosidade obtidos por microtomografia de raios X, para as duas amostragens (A e B).

Tabela 30 – Comparativo entre porosidades obtidas pelo método da curva de retenção (CR) e por microTC para a primeira amostragem (A)

	----- Porosidade total %	CR Micro porosidade %	----- Macro porosidade %	MicroTC Porosidade %
<b>Solo nat.</b>	66	22	44	24,5
<b>VF10</b>	66	26	40	16,6
<b>VF20</b>	65	26	40	15,3
<b>VF40</b>	63	28	34	10,2
<b>VG10</b>	67	24	43	18,7
<b>VG20</b>	66	23	43	22,4
<b>VG40</b>	66	22	44	25,2

Tabela 31 – Comparativo entre porosidades obtidas pelo método da curva de retenção (CR) e por microTC para a segunda amostragem (B)

	----- Porosidade total %	CR Micro porosidade %	----- Macro porosidade %	MicroTC Porosidade %
<b>Solo nat.</b>	67	27	40	27,3
<b>VF10</b>	65	27	39	22,6
<b>VF20</b>	65	28	37	19,1
<b>VF40</b>	62	32	30	12,5
<b>VG10</b>	64	27	38	25,4
<b>VG20</b>	65	25	40	28,9
<b>VG40</b>	66	26	40	30,9

De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 30 e 31, observou-se que, para ambas as amostragens, A e B, a porosidade medida por microTC apresentou um comportamento decrescente com a dose para os tratamentos com VF e crescente com a dose para os tratamentos com VG. Dessa forma, a porosidade medida por microTC guarda uma razoável correlação com a macroporosidade medida por CR que é referente aos poros com diâmetros equivalentes superiores àqueles que retêm água com tensão de 8kPa.

Substituindo este valor de tensão na Equação da Capilaridade simplificada (Eq. 20), obtém-se que o diâmetro limítrofe entre o que é considerado macro e o que

é considerado microporosidade na medida por CR, é de  $37\mu\text{m}$ , aproximadamente. Observa-se que os valores de porosidade medidos por MicroTC, apesar de guardarem correlação com os de macroporosidade medidos por CR, são todos inferiores a estes últimos. Isso significa que a medida de porosidade por MicroTC está contabilizando apenas poros com diâmetros bem maiores que  $37\mu\text{m}$ . Assim, a previsão teórica de Stock (2008), segundo a qual são contabilizados todos os poros com diâmetros superiores ao dobro do tamanho do voxel ( $24\mu\text{m}$ , neste caso), estaria subestimando o diâmetro, acima do qual, os poros são contabilizados para a medida de porosidade por MicroTC.

As Figuras 36 e 37 apresentam as curvas de correlação entre as medidas de porosidade por microTC e as medidas de macroporosidade por CR, para as amostragens A e B, respectivamente. Nesses dois casos, os valores do coeficiente de correlação  $R^2$  foram superiores a 0,8 o que indica que a microTC é uma metodologia interessante para medida de porosidade, com a vantagem de ser muito mais rápida que a curva de retenção. O cuidado que se deve ter é de ajustar a resolução (tamanho do voxel) de acordo com a faixa de tamanhos de poros que se deseja medir.

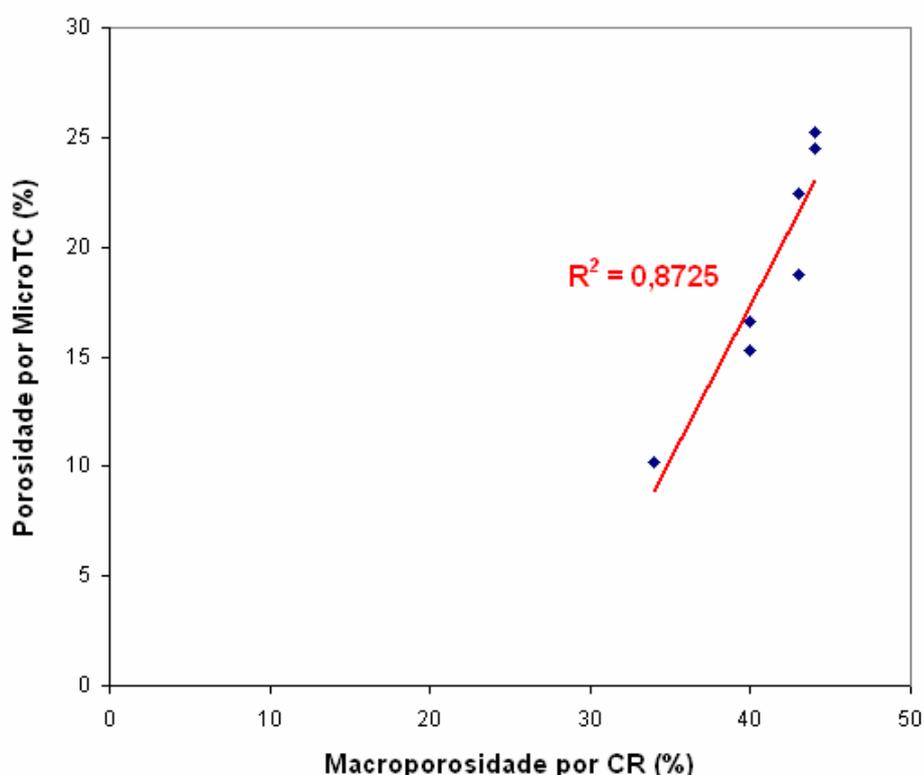


Figura 36 - Curva de correlação entre as medidas de porosidade por microTC e as medidas de macroporosidade por CR, para a amostragem A

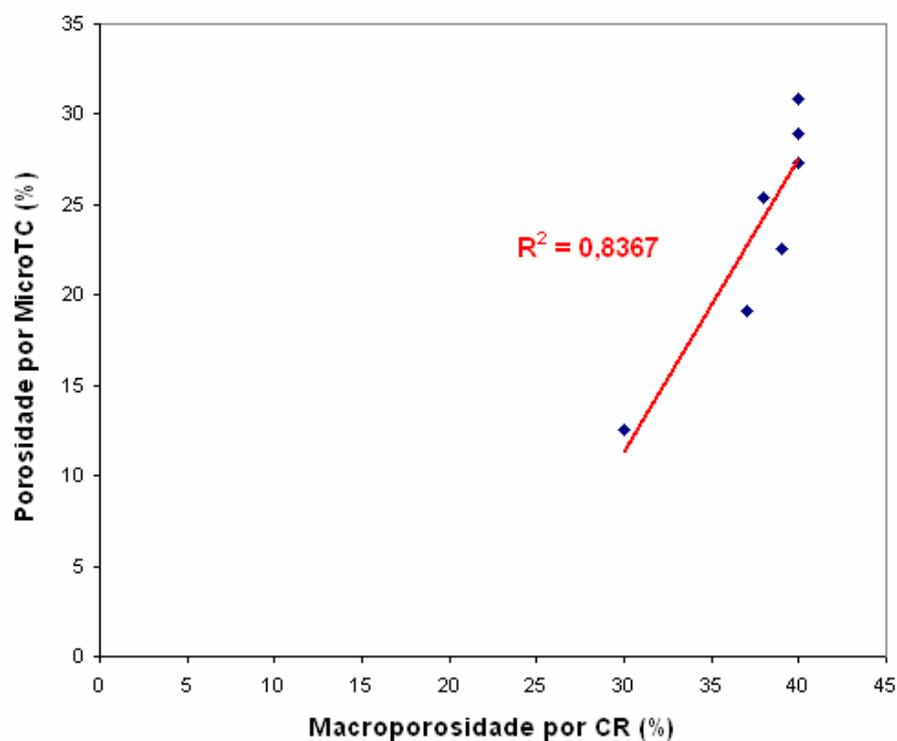


Figura 37 - Curva de correlação entre as medidas de porosidade por microTC e as medidas de macroporosidade por CR, para a amostragem B

#### 4.3.6 Produção de matéria seca da alfafa (MS)

A Figura 38 apresenta o gráfico da média da produção de matéria seca de alfafa (MS), por vaso, referente ao total acumulado dos sete cortes, em função das doses dos RCD-R cinzas aplicadas, conforme metodologia descrita no item 3.3.2.

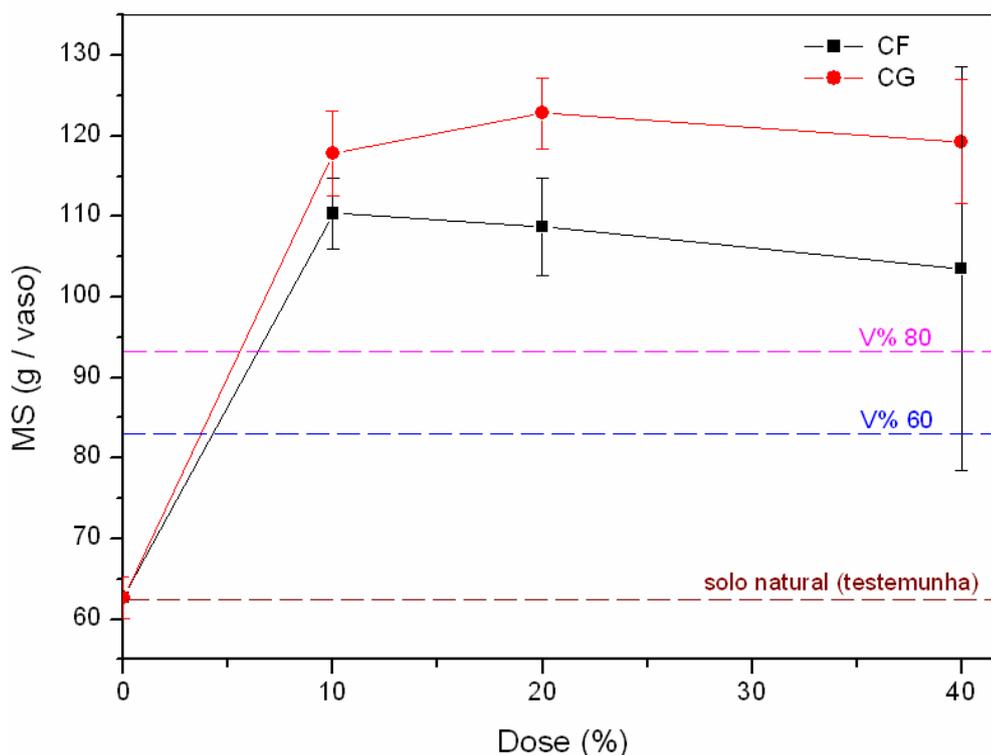


Figura 38 - Total acumulado, por vaso, da produção de matéria seca de alfafa (MS), referente aos sete cortes em função das doses dos RCD-R cinzas aplicadas

Os valores de MS obtidos, tanto nos tratamentos com CF como com CG, em todas as doses aplicadas, foram superiores aos obtidos com o solo natural (testemunha) e também superiores aos obtidos nos tratamentos com calagem convencional com calcário V% 60 e V% 80. O maior valor obtido foi o do CG20 que foi 96% superior ao do tratamento testemunha e 32% superior ao do tratamento com calcário V% 80, que é o nível de saturação por bases normalmente recomendado para a alfafa (MOREIRA et al., 2007).

O desempenho do CG foi superior ao do CF para todas as doses aplicadas. Este fato está coerente com os resultados da análise química de fertilidade (item 4.3.3) nos quais o material CG foi o que apresentou os maiores valores de CTC. Isto está relacionado ao fato do CF ter lixiviado, por efeito da irrigação, e se concentrado no fundo dos vasos.

O fato do desempenho do material CG ter sido superior ao do material CF é muito interessante por dois motivos: primeiro que o CG é mais barato que o CF, pois foi obtido por peneiramento direto do material produzido pela usina de reciclagem, enquanto a obtenção do material CF requereu uma moagem adicional, consumindo mais tempo e energia. Em segundo lugar, como o material CG possui granulometria

mais grossa, terá menor reatividade, tendo, portanto, maior tempo de permanência no solo (ou efeito residual).

Estatisticamente, os resultados de MS, tanto para os tratamentos com CF como para os tratamentos com CG, não são significativamente diferentes em relação às doses aplicadas, segundo o teste de ANOVA (teste F), com nível de significância de 5%. Isto é, a produção de matéria seca de alfafa é, estatisticamente, a mesma para as doses 10, 20 e 40% de CF ou de CG. Tanto é que, com a dose de 10%, a MS já atingia o patamar dos valores máximos obtidos, o que reforça a idéia de que as doses aplicadas foram muito altas. Provavelmente doses menores já proporcionassem desempenhos bastante satisfatórios.

A Figura 39 apresenta o gráfico da produção de matéria seca de alfafa (MS) por vaso, referente ao total dos sete cortes, em função das doses dos RCD-R vermelhos aplicadas, conforme metodologia descrita no item 3.3.3.

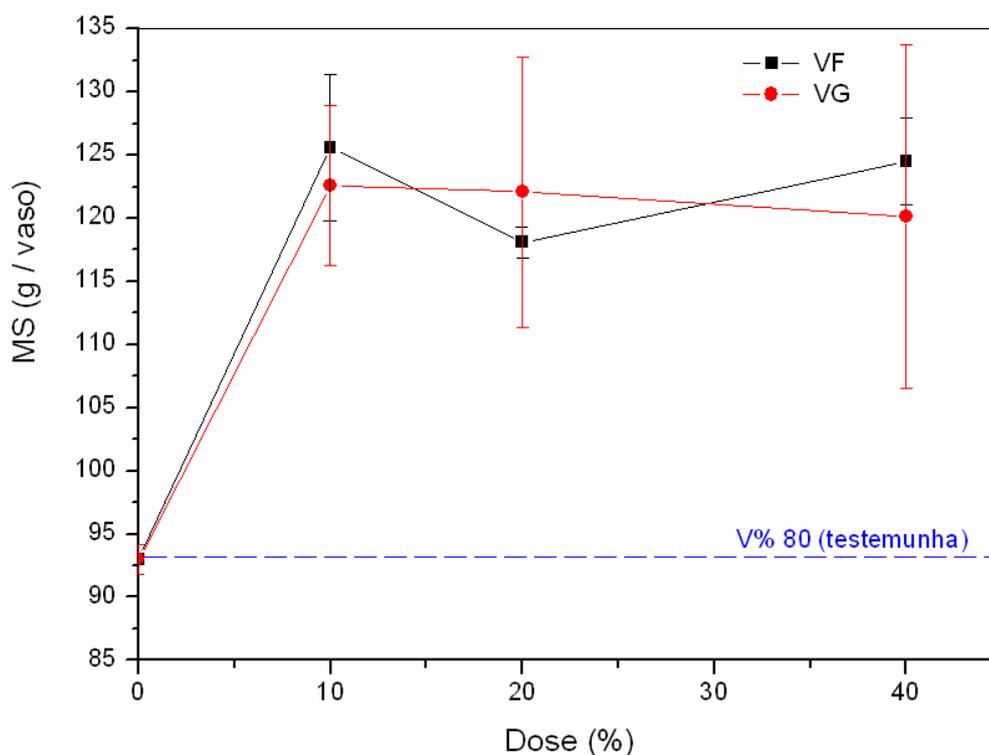


Figura 39 - Total acumulado, por vaso, da produção de matéria seca de alfafa (MS), referente aos sete cortes em função das doses dos RCD-R vermelhos aplicadas

Os valores de MS obtidos, tanto nos tratamentos com VF como com VG, em todas as doses aplicadas, foram superiores aos obtidos com o tratamento V% 80 (testemunha). O maior valor obtido foi o do VF10 que foi 35% superior ao do tratamento testemunha V% 80, que é o nível de saturação por bases normalmente recomendado para a alfafa.

Os tratamentos com VF e com VG tiveram desempenhos muito semelhantes entre si e entre todas as doses, não havendo diferença significativa, segundo o teste de ANOVA (teste F), com nível de significância de 5%. Isto é, estatisticamente, a produção de matéria seca de alfafa é a mesma para VF ou VG em qualquer uma das doses aplicadas.

Como no caso dos RCD-R cinzas, aqui também se observa que, com a dose de 10%, a MS já atingia o patamar dos valores máximos obtidos, o que reforça a idéia de que as doses aplicadas dos RCD-R vermelhos também foram muito altas, neste caso. Provavelmente doses menores já proporcionassem desempenhos bastante satisfatórios.

O fato de os tratamentos VF e VG, em todas as doses, apresentarem desempenhos, estatisticamente, iguais conflita com os resultados de curva de retenção de água e de microtomografia que apontaram os tratamentos VFs e, em especial, o VF40 com grande vantagem no que diz respeito à capacidade de retenção de água. Entretanto, neste caso em que havia irrigação diária, a capacidade de retenção de água não era um fator muito importante. Assim, o ganho de produtividade apresentado pelos tratamentos VF e VG em relação à testemunha V% 80, explica-se por razões químicas, da mesma forma como para os tratamentos CF e CG. Embora em menor grau que os RCD-R cinza, os RCD-R vermelhos também contribuíram para a correção do pH e a elevação da CTC do solo, proporcionando o aumento de produtividade observado da ordem de 30 a 35% em relação à testemunha.

A Figura 40 apresenta o gráfico da produção de matéria seca de alfafa (MS) por vaso, referente ao total acumulado dos sete cortes, para os tratamentos com as doses de 20% de VF e VG e a testemunha V% 80, com estresse hídrico (irrigação a cada dois dias), conforme metodologia descrita no item 3.3.3.

Os resultados obtidos de MS, tanto no tratamento VF20 - estresse como VG20 - estresse, foram superiores aos obtidos com o tratamento testemunha - estresse. O maior valor obtido foi o do VF20 que foi 60% superior ao do tratamento

testemunha - estresse. Observamos que este ganho percentual é, praticamente, o dobro do apresentado no caso sem estresse hídrico o que mostra que o efeito de VF e VG, no aumento da capacidade de retenção de água, é mais evidente na situação de estresse. Por outro lado, embora o ganho percentual de MS proporcionado pelos RCD-R vermelhos seja maior na situação de estresse hídrico, o patamar dos valores absolutos de MS alcançados sem estresse é muito superior aos valores de MS da situação de estresse, como pode ser observado na Figura 41 que mostra, no mesmo gráfico, os resultados de MS obtidos para os RCD-R vermelhos na situação de estresse hídrico e na ausência dele.

Este fato deve-se à grande sensibilidade que a alfafa possui ao estresse hídrico (MOREIRA et al., 2007). De acordo com Rassini (2001), a alfafa é uma forrageira que precisa de elevadas quantidades de água mesmo se comparada com espécies C<sub>4</sub> como milho e sorgo, tendo necessidades hídricas entre 800 e 1600 mm por período de crescimento. Ainda segundo Rassini (2001), são necessários de 600 a 900 kg de água por kg de matéria seca de forragem produzida.

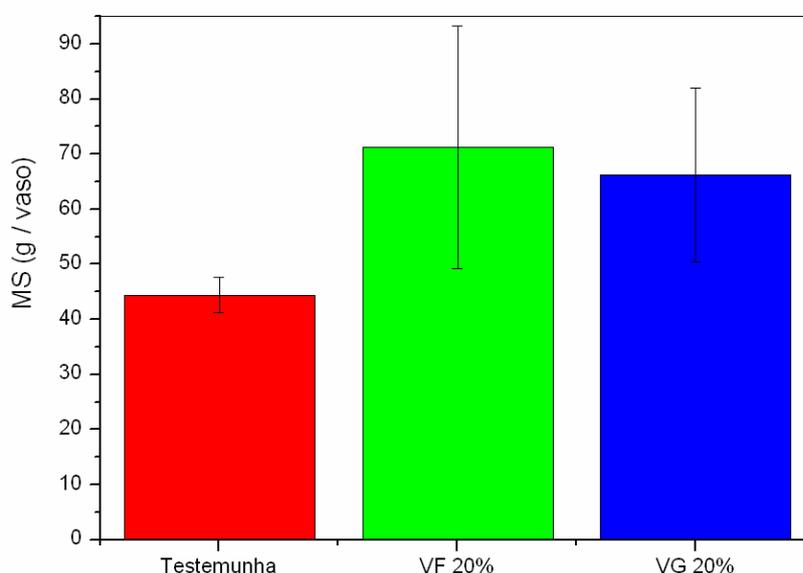


Figura 40 - Total acumulado, por vaso, da produção de matéria seca de alfafa (MS) dos sete cortes para os tratamentos com as doses de 20% de VF e VG e a testemunha V% 80, com estresse hídrico (irrigação a cada dois dias)

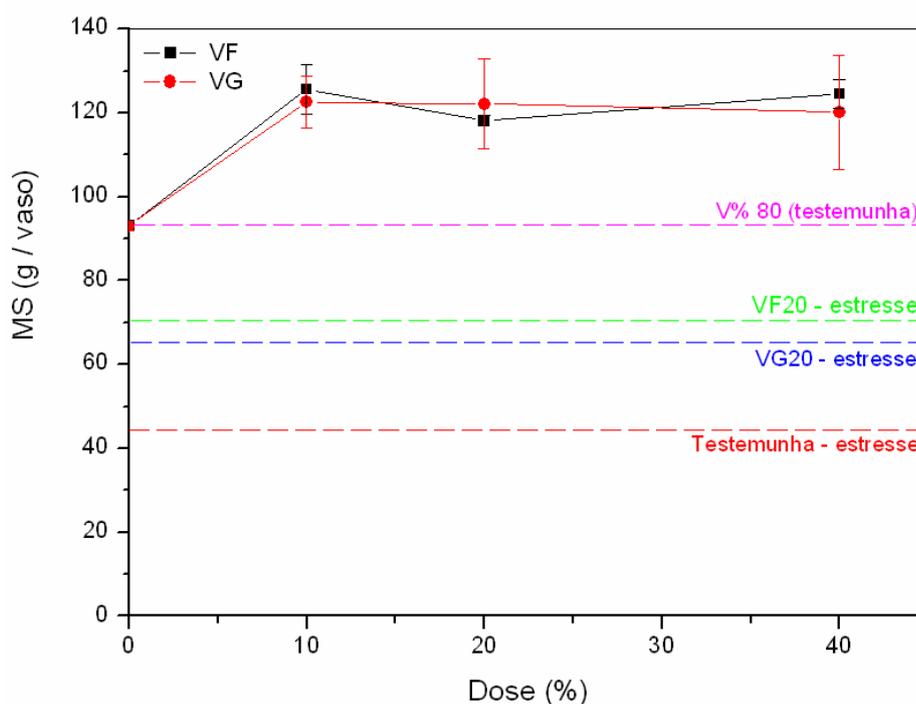


Figura 41 - Resultados de MS obtidos para os RCD-R vermelhos na situação de estresse hídrico e na sua ausência

Embora nesta dose de 20%, utilizada no experimento com estresse hídrico, já tenha sido observada uma pequena vantagem de VF em relação à VG, as médias dos tratamentos VF20 e VG20 com estresse hídrico não foram, estatisticamente, significativamente diferentes entre si, mas diferiram significativamente do tratamento testemunha - estresse pelo teste ANOVA (teste F), com nível de significância de 5%. Entretanto, com base nos resultados de curva de retenção, é provável que essa vantagem de VF sobre VG aumente para doses maiores.

Com o objetivo de estimar os valores de MS para outras doses, no caso de irrigação diária, os valores medidos para os tratamentos CF, CG, VF e VG, em função das doses aplicadas, foram ajustados ao modelo representado pela Equação 33.

$$MS = C + A (1 - e^{-kd}) \quad (33)$$

Sendo:

- .-MS a produção de matéria seca (g / vaso);
- .-d a dose aplicada (%);
- .-A, C e k parâmetros de ajuste.

Os parâmetros de ajuste, apresentados na Tabela 32, foram obtidos pelo método não-linear de mínimos quadrados (Wraith e Or, 1998), usando a ferramenta *solver* do Excel (Microsoft®).

Tabela 32 - Valores dos parâmetros de ajuste ao modelo representado pela Equação 33 para os tratamentos CF, CG, VF e VG

	<b>A</b>	<b>C</b>	<b>k</b>
<b>CF</b>	44,833	62,701	1,973
<b>CG</b>	58,337	62,695	0,296
<b>VF</b>	29,733	93,000	2,138
<b>VG</b>	28,600	93,000	2,138

A Figura 42 mostra um gráfico comparativo entre os valores de MS medidos e estimados por meio do modelo representado pela Equação 33, para os tratamentos CF, CG, VF e VG. Este modelo pressupõe que a variação da MS com a dose de CF, CG, VF ou VG possui uma fase crescente para doses baixas, entrando numa outra fase que é um patamar constante para doses acima de um determinado valor, o que é coerente com os padrões de valores medidos.

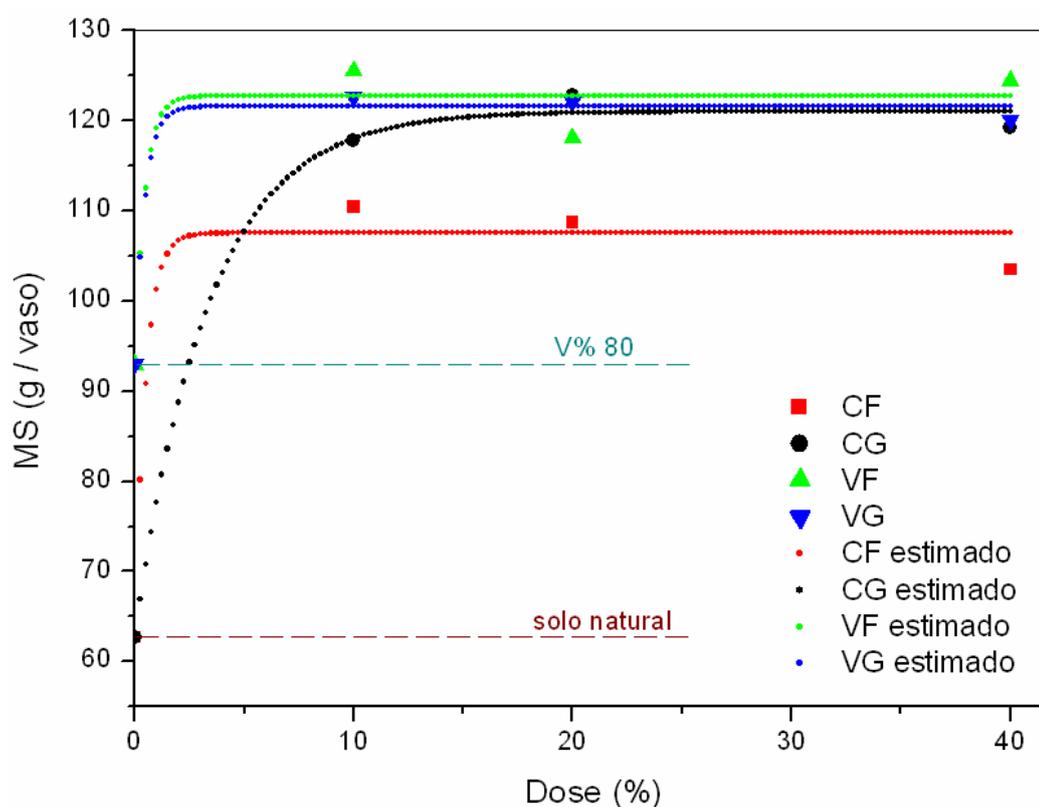


Figura 42 - Gráfico comparativo entre os valores de MS medidos e estimados por meio do modelo representado pela Equação 33, para os tratamentos CF, CG, VF e VG

Os valores dos patamares para os tratamentos CG, VF e VG são praticamente iguais, enquanto o valor do patamar de CF é, aproximadamente, 10% menor que os demais. Isto deve estar relacionado ao fato do RCD-R do tipo CF ter lixiviado, conforme demonstrado no item 4.3.3, o que prejudicou seu desempenho na produção de matéria seca de alfafa.

De acordo com os valores estimados de MS, mostrados na Figura 42, o comportamento para baixas doses pode apresentar um crescimento bastante abrupto como os estimados para CF, VF e VG ou um pouco mais suave como o estimado para CG. No caso do tratamento CF, a dose de 0,5% já seria suficiente para proporcionar um desempenho semelhante ao da calagem convencional com calcário ao nível  $V\% = 80$ . Entretanto, para o tratamento CG, a dose necessária para este mesmo desempenho seria de, aproximadamente, 2,5%, segundo essas estimativas. Isso deixa clara a necessidade de se estudar melhor o comportamento para baixas doses.

#### **4.4 Curvas de neutralização da acidez do solo com CF e CG**

Os resultados da análise de neutralização de CF e CG, conforme metodologia descrita no item 3.4, são apresentados nas Figuras 43, 44 e 45. Chamamos a atenção para o fato de que os valores do eixo das abscissas, que representam as doses utilizadas, são válidos apenas para os tratamentos com CF e CG. Os tratamentos com calcário possuem uma escala própria de doses (D1, D2, D3 e D4) equivalente à 2, 4, 6 e 8 t/ha.

A Figura 43 apresenta o gráfico do pH em função das doses de CF, CG e calcário para as amostragens realizadas com 30 e 120 dias de incubação.

A Figura 44 apresenta o gráfico da CTC em função das doses de CF, CG e calcário para as amostragens realizadas com 30 e 120 dias de incubação.

A Figura 45 apresenta o gráfico da saturação por bases (V%) em função das doses de CF, CG e calcário para as amostragens realizadas com 30 e 120 dias de incubação.

Nos gráficos das Figuras 43, 44 e 45, os pontos experimentais foram interpolados por curvas sigmoidais com auxílio do *software* Origin, versão 6.1.

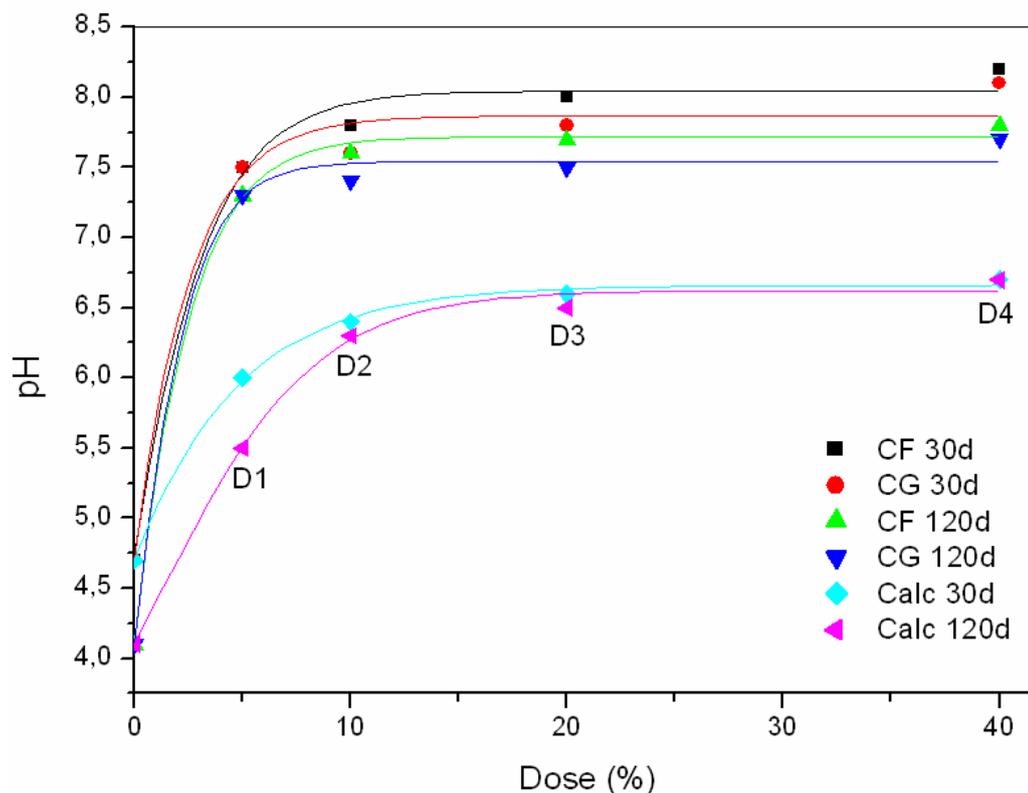


Figura 43 - Dependência do pH com a dose para os tratamentos CF 30d, CG 30d, CF 120d, CG 120d, Calc 30d e Calc 120d

Com base no gráfico da Figura 43, observa-se que a dose de 5% de CG e CF já pode ser considerada elevada, pois manteve o solo alcalino mesmo após 120 dias de incubação. Isso reforça a idéia de que doses mais baixas já seriam suficientes para corrigir o pH deste solo. Para doses mais elevadas, os valores de pH não cresceram proporcionalmente, mas apresentaram tendência de se estabilizar em torno de 7,7 para os tratamentos com CF e CG e 6,5 para os tratamentos com calcário. Isso mostra que nem as doses mais altas de calcário conseguiram neutralizar totalmente a acidez do solo.

A taxa de queda do pH com o tempo cresceu com o aumento da dose de CG e CF. Considerando a dose de 5%, o pH dos tratamentos com CF e CG caiu apenas de 7,5 para 7,3 no intervalo de 90 dias, mas, à medida que a dose aumentava, esta queda também crescia. A razão disso deve estar relacionada ao fato de que, em altas doses, atingia-se, num curto prazo, valores elevados de pH que não se sustentavam por muito tempo, tendendo ao pH neutro depois de algum tempo. Por outro lado, com o calcário ocorreu um processo inverso, isto é, a taxa de queda do

pH com o tempo diminuiu com o aumento da dose. Isso deve indicar que as doses D1 e D2 (2 e 4 t/ha) eram muito baixas, não atingindo o patamar de tamponamento químico do sistema.

Observa-se que o solo natural (dose 0%) sofreu um processo de acidificação nesses 90 dias que separam a primeira e a segunda amostragem. Se fosse possível descontar este efeito, é provável que todas as curvas referentes aos tratamentos de 120 dias se aproximassem dos de 30 dias.

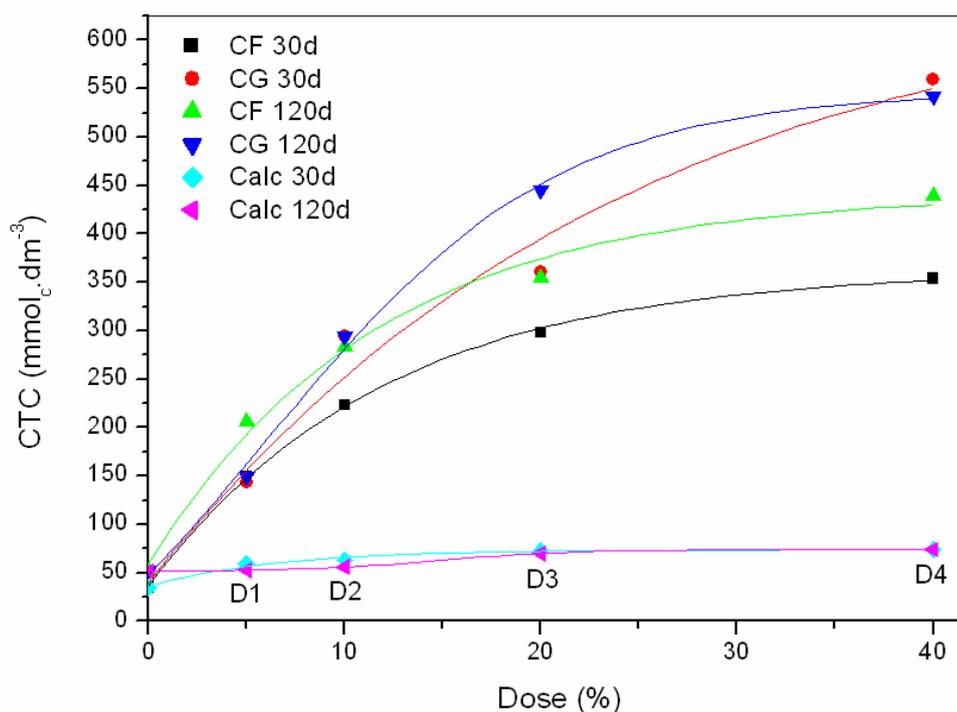


Figura 44 - Dependência da CTC com a dose para os tratamentos CF 30d, CG 30d, CF 120d, CG 120d, Calc 30d e Calc 120d

Com base no gráfico da Figura 44, pode-se observar que, para os tratamentos com CF e CG, a CTC apresentou um comportamento crescente com a dose aplicada, manifestando tendência de estabilização para doses superiores a 40%. Por outro lado, os tratamentos com calcário proporcionaram um incremento ínfimo na CTC em relação ao solo natural e, ainda assim, apenas para doses D3 e D4 (6 e 8 t/ha), o que reforça a idéia de que as doses D1 e D2 eram realmente muito baixas.

Nota-se que, mesmo para a dose mais baixa de 5% de CF e CG, os valores de CTC situam-se em uma faixa bastante satisfatória entre 150 e 200  $\text{mmolc.dm}^{-3}$ .

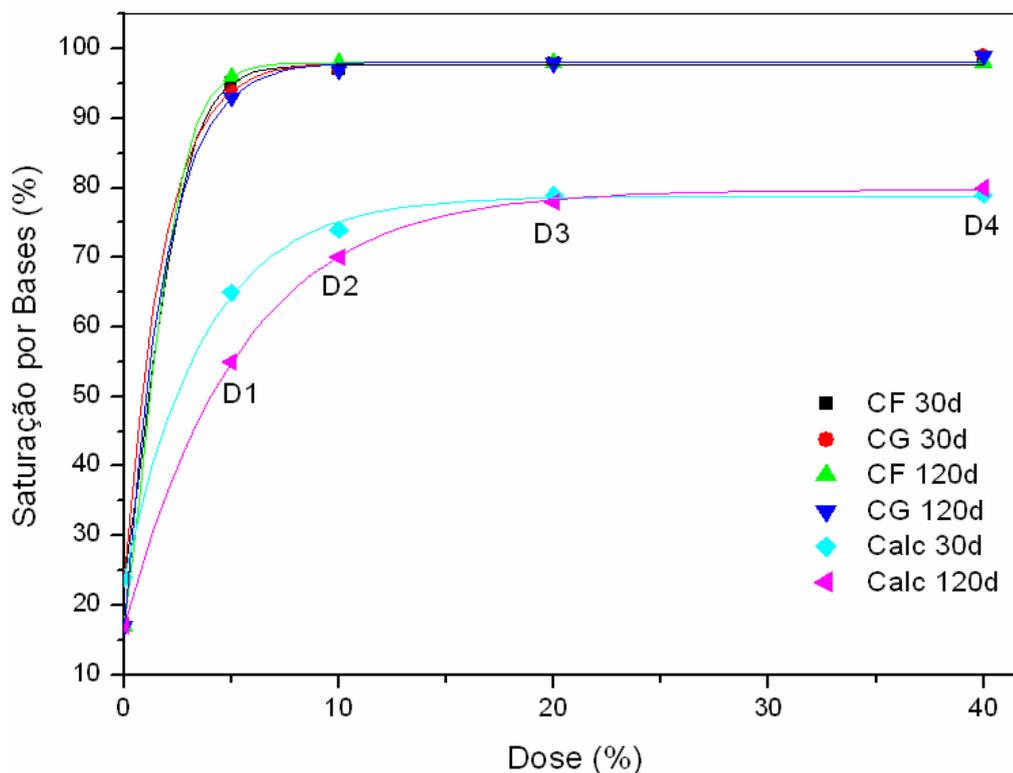


Figura 45 - Dependência da V% com a dose para os tratamentos CF 30d, CG 30d, CF 120d, CG 120d, Calc 30d e Calc 120d

Com base no gráfico da Figura 45, observa-se que, em todos os tratamentos com CF e CG, a saturação por bases (V%) apresentou um comportamento muito semelhante e fortemente crescente com a dose aplicada para uma faixa de doses bem baixas (abaixo de 5%), estabilizando em torno do valor de 98% para doses superiores a 10%. Por outro lado, os tratamentos com calcário apresentaram também um comportamento crescente com a dose aplicada, estabilizando em torno do valor de 79% para doses superiores a D3 (6 t/ha).

Nota-se que, mesmo para a dose mais baixa, de 5%, de CF e CG, os valores da saturação por bases são bastante elevados situando-se em torno de 95%. A fim de detalhar melhor a região de doses abaixo de 5% para os tratamentos com CF e CG, os valores médios da saturação por bases destes tratamentos foram ajustados ao modelo representado pela Equação 34.

$$V\% = C + A (1 - e^{-kd}) \quad (34)$$

Sendo:

- .-V% a saturação por bases (%);
- .-d a dose aplicada (%);
- .-A, C e k parâmetros de ajuste.

Os parâmetros de ajuste foram obtidos pelo método não-linear de mínimos quadrados (Wraith e Or, 1998), usando a ferramenta *solver* do Excel (Microsoft®). Este ajuste resultou nos seguintes valores para A, C e k:

$$A = 81$$

$$C = 17$$

$$k = 1,5$$

Um detalhamento para doses baixas das curvas dos valores médios de saturação por bases dos tratamentos com CF e CG, tanto medidos como estimados pelo modelo da Equação 34, é mostrado na Figura 46.

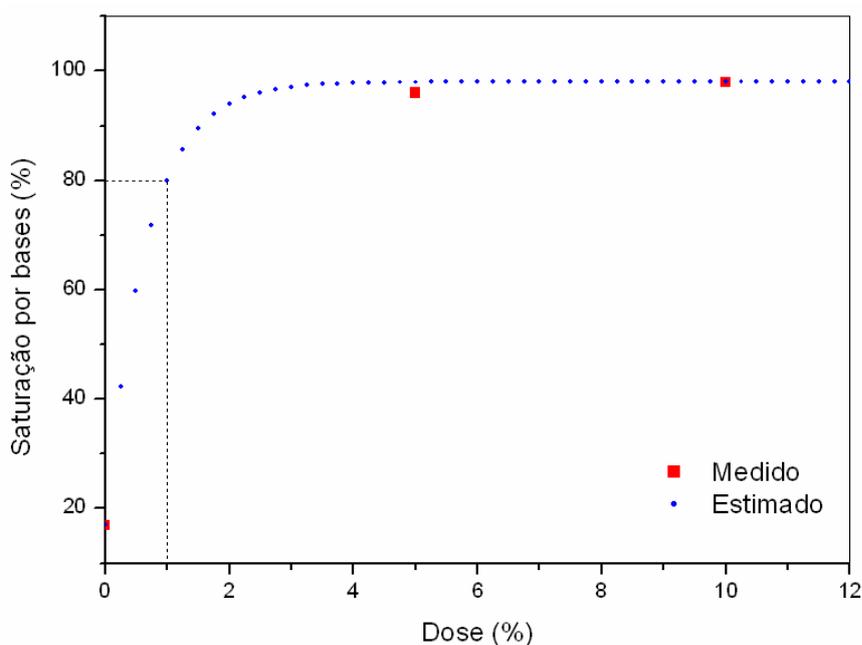


Figura 46 - Curvas da saturação por bases em função da dose, medida e estimada pelo modelo da Equação 34, para os tratamentos com CF e CG - detalhamento para doses baixas

Considerando que o valor de saturação por bases indicado na literatura para alfafa é de 80% (MOREIRA et al., 2007), as linhas pontilhadas da Figura 46 indicam que a dose necessária de CF ou CG para isso, seria de aproximadamente 1%, em massa.

No caso de aplicação extensiva no campo, para tratar a camada 0 – 20 cm com esta dose de 1%, em massa, seriam necessárias 24 t/ha de CF ou CG, considerando a densidade do solo igual a  $1,2 \text{ t.m}^{-3}$ . Nesse caso, o custo do frete poderia inviabilizar tal aplicação. Por outro lado, como o efeito residual de CF e CG é bastante prolongado, esta dose de 24 t/ha poderia ser dividida em quatro doses de 6 t/ha, sendo aplicada uma a cada seis meses.

Uma grande vantagem do RCD-R em relação ao calcário é que a geração do primeiro ocorre de forma distribuída em todos os municípios, enquanto o segundo é produzido apenas nas áreas de mineração de calcário. No Brasil, a distribuição geográfica das reservas de calcário é muito irregular, com grandes extensões nas regiões central e litorânea e apenas pequenos afloramentos nas regiões do extremo norte e sul do País (NERI, 2007). Como o custo do frete é o que tem maior impacto no custo final, tanto do RCD-R, como do calcário, a geração mais distribuída do primeiro tende a baratear, em média, o seu frete.

Em um levantamento realizado no município de São Carlos - SP, verificou-se que o custo final do RCD-R, incluindo o frete até distâncias de, no máximo, 20km da cidade, seria de R\$17,00 por tonelada. Por outro lado, no caso do calcário, o custo da tonelada entregue nas mesmas condições seria, em média, de R\$60,00, isto é, três vezes e meia o valor do custo do primeiro. Este dado pode tornar a aplicação dos RCD-R cinza financeiramente viável, em alguns casos.

Outra possibilidade para viabilizar a utilização de RCD-R como corretivo de acidez do solo para aplicações extensivas seria a de desenvolver um processo, economicamente viável, de separação e retirada do quartzo (que corresponde a 80% do material) concentrando a sua parte ativa. Isso aumentaria em muito a eficiência do RCD-R, permitindo a utilização de doses bem menores, além de reduzir o custo do frete.

Outro aspecto a ser considerado é o ambiental. A atividade de mineração de calcário gera uma série de impactos como alcalinização e aumento da concentração de cálcio e magnésio nos recursos hídricos (FRITZSONS et al., 2009), impacto visual com a degradação da paisagem, alteração do relevo e alteração da qualidade

das águas subterrâneas e superficiais (NERI, 2007). Por outro lado, a utilização de RCD-R como corretivo de acidez do solo criaria mais uma alternativa para utilização desses materiais, contribuindo para uma disposição final ambientalmente correta desses resíduos. Dessa forma, mesmo não possuindo a mesma eficácia do calcário na correção da acidez do solo, a utilização do RCD-R cinza pode se justificar por razões ambientais.

Outras situações nas quais esses materiais poderiam ter interessantes aplicações seriam em áreas como jardinagem, na composição de substratos para plantio em vasos ou na preparação de covas para culturas permanentes.

Uma questão a ser considerada é que a adição de CF ou CG pode alterar a textura do solo no sentido de torná-lo mais arenoso e siltoso, e menos argiloso. Isso seria interessante em casos nos quais o solo em questão já fosse bastante argiloso, apresentando problemas de compactação. Neste caso, a adição de CF ou CG poderia melhorar as propriedades físicas deste solo e suas condições de manejo agrícola.

## 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos permitem chegar às seguintes conclusões:

O RCD-R cinza não apresenta efeitos favoráveis quanto ao aumento da capacidade de retenção de água do solo, mas apresenta importantes efeitos como corretivo de acidez do solo.

A utilização do RCD-R cinza em cultura de alfafa proporciona significativos ganhos de produtividade, pois este material é capaz de neutralizar a acidez e elevar a CTC do solo, funcionando também como uma importante fonte de magnésio e, principalmente, de cálcio para as plantas. Entretanto, como o RCD-R cinza não atinge os níveis de PN, PRNT e dos teores de CaO e MgO necessários para registro como corretivo de acidez do solo, são necessárias doses muito elevadas. Estima-se que, para aplicação extensiva em cultura de alfafa, para tratar uma camada de 20 cm de solo, seriam necessárias 24 t/ha ou 1% em massa, o que pode inviabilizar esta forma de utilização. Por outro lado, para aplicações em propriedades próximas aos centros produtores de RCD-R, o seu custo pode ser muito inferior ao do calcário, viabilizando financeiramente a sua utilização, em alguns casos.

O RCD-R do tipo cinza-grosso (CG) é o que apresenta melhor desempenho na produção de matéria seca de alfafa, devido à sua menor perda por lixiviação.

O RCD-R cinza é composto por 80% de quartzo, material que não tem função corretiva de acidez do solo. Dessa forma, abre-se a possibilidade de desenvolver processos de separação e retirada do quartzo, concentrando a parte ativa desse material.

O RCD-R vermelho apresenta efeitos muito reduzidos como corretivo de acidez do solo, mas, em granulometria abaixo de 500 $\mu$ m, é capaz de elevar significativamente a capacidade de retenção de água do solo, principalmente os de textura mais arenosa. No entanto, este efeito é proporcional à dose e passa a ser mais sensível acima de doses relativamente altas, como 20% em massa. Para aplicações extensivas, esta dose representaria 480 t/ha, o que é totalmente inviável. Como na composição do RCD-R vermelho há também uma grande quantidade de quartzo, que não tem função retentora de água, abre-se, também aqui, a possibilidade de desenvolver processos de separação e retirada do quartzo,

concentrando a parte ativa desse material, de modo a permitir a utilização de doses menores.

A utilização do RCD-R vermelho, em situações de estresse hídrico, em cultura de alfafa proporciona significativos ganhos de produtividade, pois a presença desse material no solo promove o aumento da sua microporosidade, elevando, portanto, a sua capacidade de retenção de água.

Devido às altas doses necessárias, tanto o RCD-R cinza como o vermelho podem encontrar interessantes aplicações em áreas como jardinagem, na composição de substratos para plantio em vasos ou na preparação de covas para culturas permanentes.

Embora não tenham sido detectados contaminantes potencialmente perigosos em concentrações acima dos valores de alerta no RCD-R produzido pela Usina de Reciclagem da Prohab no município de São Carlos, recomenda-se uma análise prévia desses potenciais contaminantes, sempre que se desejar aplicar RCD-R ao solo, devido a grande heterogeneidade de materiais e a grande variedade de fontes de RCD que dão origem aos agregados reciclados. Além disso, no caso de aplicações sucessivas, é importante avaliar os efeitos cumulativos no solo.

O presente trabalho de doutorado inaugura uma nova linha de pesquisa em aplicações de RCD-R para a melhoria da qualidade do solo para fins agrícolas. Nesse sentido, existem vários desafios a serem enfrentados dos quais podem ser citados os seguintes:

- Estudo da utilização de RCD-R com outras culturas, outros tipos de solo e outras formas de plantio;
- Estudo da utilização de doses mais baixas;
- Caracterização dos efeitos físicos e químicos, no solo, da utilização de RCD-R a médio e longo prazos;
- Caracterização do RCD-R produzido em outras regiões do país;
- Desenvolvimento de metodologia, economicamente viável, para separação e retirada do quartzo, concentrando a parte ativa do RCD-R.

## REFERÊNCIAS

AKHTER, J.; MAHMOOD, K.; MALIK, K. A.; MARDAN, A.; AHMAD, M.; IQBAL, M. M. Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea. **Plant Soil and Environment**, Praha, Czech Republic, v. 50, n. 10, p. 463-469, 2004.

ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos**: características e interpretações técnicas. São Paulo: ANDA, 2005. 24 p. (Boletim Técnico).

ALCARDE, J. A.; RODELLA, A. A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 291-333, 2003.

ALLEN, E. R.; MING, D. W.; HOSSNER, L. R.; HENNINGER D. L.; GALINDO, C. Growth and nutrient uptake of wheat in clinoptilolite-phosphate rock sbstrates. **Agronomy Journal**, Madison, v. 87, n. 6, p. 1052-1059, 1995.

AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do solo**: conceitos e aplicações. Fortaleza, CE: Imprensa Universitária, 2008. 290 p.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Variabilidade dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. **e-Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 22-32, 2004.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos**. 2005. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

AOUADA, F. A.; MOURA, M. R.; FERNANDES, P. R. G.; RUBIRA, A. F.; MUNIZ, E. C. Optical and morphological characterization of polyacrylamide hydrogel and liquid crystal systems. **European Polymer Journal**, Oxford, v. 41, p. 2134-2141, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

BELLIGNO, A.; DI LEO, M. G.; MARCHESE, M.; TUTTOBENE, R. Effects of industrial orange wastes on soil characteristics and on growth and production of durum wheat. **Agronomy for Sustainable Development**, Versailles, v. 25, n. 1, p. 129-135, 2005.

BELMONTE, E. P. **Espectrometria por fluorescência de raios X por reflexão total**: um estudo simulado utilizando o método de Monte Carlo. 2005. 164 p. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BERNARDI, A. C. C.; BERNARDI, M. R. V.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; MONTE, M. B. de M. Produção, aparência e teores de nitrogênio, de fósforo e de potássio em alface cultivada em substrato com zeólita. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 3, n. 4, p. 920-924, 2005.

BERNARDI, A. C. C.; MENDONÇA, F. C.; HAIM, P. G.; WERNECK, C. G.; MONTE, M. B. de M. Disponibilidade de água e produção de arroz em função de doses de concentrado zeolítico. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 2, p. 123-134, 2009.

BERNARDI, A. C. C.; MONTE, M. B. de M. Zeólita aumenta produtividade de alimentos. **A Lavoura**, Rio de Janeiro, v. 107, n. 648, p. 18-19, 2004.

BRANDSMA, R. T.; FULLEN, M. A.; HOCKING, T. J. Soil conditioner effects on soil structure and erosion. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 54, n. 2, p. 485-489, 1999.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instrução Normativa nº 27, de 05 de junho de 2006. Aprova os limites máximos de agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas admitidos nos fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n.110, 09. jun. 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instrução Normativa DAS nº 28 de 27 de julho de 2007, dispõe sobre manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 jul. 2007.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 15 dez. 2010.

BRASIL. Secretaria de Apoio Rural e Cooperativismo (SARC). Instrução Normativa nº 4 de 2 de agosto de 2004. Aprova as definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos corretivos de acidez, corretivos de alcalinidade, corretivos de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 5 ago. 2004.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência de engenharia de materiais**: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química e física de solos do IAC**. Campinas: IAC, 2009. 94 p. (Boletim Técnico, 106).

CHOUDHARY, M. I.; SHALABY, A. A.; ALOMRAN, A. M. Water-holding capacity and evaporation of calcareous soils as affected by 4 synthetic-polymers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 26, n. 13-14, p. 2205-2215, 1995.

CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212 p. (Documentos, 1).

COSTA, M. P. **Efeito da matéria orgânica em alguns atributos do solo**. 1983. 137 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1983.

CRETA. Tecnologias em reciclagem. **Resíduos de construção e demolição (RCD)**. Florianópolis, SC, 2009. Disponível em: <[http://cretatec.com.br/index.php?Itemid=78&catid=29:wiki-residuos&id=56:residuos-de-construcao-e-demolicao&option=com\\_content&view=article](http://cretatec.com.br/index.php?Itemid=78&catid=29:wiki-residuos&id=56:residuos-de-construcao-e-demolicao&option=com_content&view=article)>. Acesso em: 26 mar. 2011.

DIAS-JUNIOR, M. de S. Compactação do solo. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, v. 1, p. 55-94, 2000.

EC. EUROPEAN COUNCIL. **Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption as amended by Regulations 1882/2003/EC and 596/2009/E**. Brussels: 1998. (98/83/EC).

EMBRAPA. **Racionalização do uso de insumos**: subprojeto pesquisa em racionalização de fertilizantes e corretivos na agricultura. Brasília, DF, 1980. 78 p.

EL-SAIED, H.; WALEY, A. I.; BASTA, A. H.; EL-HADI, O. High water absorbents from lignocelluloses. II. Novel soil conditioners for sandy soil from lignocellulosic wastes. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, London, v. 43, n. 3, p. 779-795, 2004.

FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de. (Ed.). **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental**: solo, água e sedimentos. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 169 p.

FREDE, H. G.; LUTKEMOLLER, D.; GENEAD, A.; NEURURER, H. Effect of bituminous mulch on soil-structure and on evaporation control in soils of arid regions. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 7, n. 1, p. 47-55, 1994.

FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L. E.; CHAVES NETO, A.; HINDI, E. C. A influência das atividades mineradoras na alteração do pH e da alcalinidade em águas fluviais: o exemplo do Rio Capivari, região de carste paranaense. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 381-390, 2009.

GESTÃO ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SindusCon-SP. São Paulo: Obra limpa: I&T: SindusCon-SP, 2005. 48 p.

LASSO, P. R. O.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. de M. **Recomendações para utilização do microtomógrafo de raios-X Sky Scan 1172 em ciências agrárias e biológicas**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 22 p. (Documentos; 37).

LENTZ, R. D. Inhibiting water infiltration with polyacrylamide and surfactants: Applications for irrigated agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 58, n. 5, p. 290-300, 2003.

LENTZ, R. D.; SOJKA, R. E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration. **Soil Science**, New Brunswick, v. 158, n. 4, p. 274-282, 1994.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 329 p.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduos de construção reciclados e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 222 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LOPES, A. S.; SILVA, M. de C.; GUILHERME, L. R. G. **Acidez do solo e calagem**. 3. ed. São Paulo: ANDA, 1991. 22 p. (Boletim Técnico, 1).

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas: aspectos agronômicos**. 3. ed. rev. e atualizada. São Paulo: ANDA, 2000. 72 p. (Boletim Técnico, 4).

LOPES, C. F.; TAMANINI, C. R.; MONTE SERRAT, B.; LIMA, M. R. **Acidez do solo e calagem**. Curitiba: UFPR. 2002. Projeto de Extensão Universitária Solo Planta. folder. Disponível em: <<http://www.soloplan.agrarias.ufpr.br/acidez.htm>>. Acesso em: 23 jul. 2010.

MACEDO, A.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; CRUVINEL, P. E.; CRESTANA, S. X-ray microtomography to characterize the physical properties of soil and particulate systems. **Powder Technology**, Lausanne, v. 101, n. 2, p. 178-182, 1999.

MARTINS, A.; MARCONDES, C. G.; MADI, F.; NEVES, I. F.; AOKI, J.; TOKUDOME, N.; MERCADÉ, S. R. **Cimento: treinamento de mão de obra para construção civil**. Curitiba: Cia de Cimento Itambé, 2008. 22 p. Apostila.

MBAGWU, J. S. C.; UNAMBAOPARAH, I.; NEVOH, G. O. Physicochemical properties and productivity of 2 tropical soils amended with dehydrated swine waste. **Bioresource Technology**, Essex, v. 49, n. 2, p. 163-171, 1994.

MELLO FILHO, C. H. R. **Estudo de caracterização e aplicação dos resíduos sólidos gerados na fabricação de precipitado de carbonato de cálcio como corretivo da acidez do solo**. 2005. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Rede Temática em Engenharia de Materiais. Convênio entre a Universidade do Estado de Minas Gerais, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais e a Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

MIKKELSEN, R. L.; BEHEL, A. D.; WILLIAMS, H. M. Using hydrophilic polymers to improve uptake of manganese fertilizers by soybeans. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 41, p. 87-92, 1995.

MING, D. W.; MUMPTON, F. A. Zeolites in soils. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. 2. ed. Madison: SSSA, 1989. p. 873-911.

MOREIRA, A.; BERNARDI, A. C. C.; RASSINI, J. B.; FERREIRA, R. P.; OLIVEIRA, P. P. A. **Fertilidade do solo e estado nutricional da alfafa cultivada nos trópicos**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. 40 p. (Documentos, 67).

MOURA, M. R.; GUILHERME, M. R.; CAMPESE, G. M.; RADOVANOVIC, E.; RUBIRA, A. F.; MUNIZ, E. C. Porous alginate-Ca<sup>2+</sup> hydrogels interpenetrated with PNIPAAm networks: Interrelationship between compressive stress and pore morphology. **European Polymer Journal**, Oxford, v. 41, n. 12, p. 2845-2852, 2005.

NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 31, n. 3, p. 295-304, 2001.

NERI, A. C. **Avaliação da eficácia de medidas de recuperação ambiental em mineração de calcário para cimento**. 2007. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PEIXOTO, A. M.; TOLEDO, F. F.; REICHARDT, K.; SOUSA, J. S. I. **Enciclopédia agrícola brasileira**. Piracicaba: Edusp: ESALQ/USP, 1998. v. 2, 409 p.

PRADO, H. **Solos tropicais**: potencialidades, limitações, manejo e capacidade de uso. 2. ed. Jaboticabal: FUNDEP, 1998. 231 p.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001. 285 p.

RAMALHO, A. M.; PIRES, A. M. M. Viabilidade do uso agrícola de resíduo da construção civil e da indústria cerâmica: atributos químicos. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 3., 2009, Campinas. **Anais...** Campinas: ITAL; IAC; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. 1 CD-ROM.

RAMOS, L. A.; NOLLA, A.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Reatividade de corretivos de acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 849-857, 2006.

RASSINI, J. B. Manejo de água de irrigação para alfafa (*Medicago sativa* L.). **Revista Brasileira de Zootecnia** [online], Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1681-1688, 2001.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. Barueri, SP: Manole, 2004. 478 p.

RIPOLI FILHO, F. A utilização do rejeito industrial cerâmico - chamote - como fator de qualidade na fabricação de elementos cerâmicos: um estudo experimental. **Cerâmica**, São Paulo, v. 43, n. 281-282, p. 132-138, 1997.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 168 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SCHAEFER, C. O.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Estudo do comportamento de lixiviação de argamassas produzidas com agregados reciclados. **Exacta**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 243-252, 2007.

SEN, K. K.; BHADORIA, P. B. S.; DATTA, B. Influence of soil conditioners on soil physical-properties and maize growth. **Tropical Agriculture**, London, v. 72, n. 1, p. 23-27, 2005.

SHULGA, G.; REKNER, F.; VARSLAVAN, J. Lignin-based interpolymer complexes as a novel adhesive for protection against erosion of sandy soil. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v. 78, n. 3, p. 309-316, 2001.

SILVA, A. M.; CRUVINEL, P. E.; NETO, A. T.; INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S. **Tomógrafo de resolução micrométrica para estudos de solos**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 1997. 44 p. (Boletim de Pesquisa, 4).

SIVAPALAN, S. 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.

SKYSCAN. **Skyscan 1172**: desktop X-ray microtomograph: instruction manual. Aartselaar, Belgium, 2005. 54 p.

STOCK, S. R. Recent advances in X-ray microtomography applied to material. **International Materials Reviews**, London, n. 53, p. 129-181, 2008.

TOWNSEND, T.; TOLAYMAT, T.; LEO, K.; JAMBECK, J. Heavy metals in recovered fines from construction and demolition debris recycling facilities in Florida. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 332, p. 1-11, 2004.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Solos e fertilidade do solo**. 6. ed. São Paulo: Ed. Andrei, 2007. 718 p.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAZ, C. M. P.; HOPMANS, J. W.; HERRMANN, P. S. P. Development of time domain reflectometry probes for combined use with a cone penetrometer. In: WORKSHOP ON ELECTROMAGNETIC WAVE INTERACTION WITH WATER AND

MOIST SUBSTANCES, 3., 1999, Athens, Georgia. **Proceedings...** Athens: USDA, Agricultural Research Services, 1999. p. 11-13.

WEI, H.; HE, J.; SUN, L.; ZHU, K.; FENG, Z. Gel formation and photopolymerization during supramolecular self-assemblies of alpha-CDs with LA-PEG-LA copolymer end-capped with methacryloyl groups. **European Polymer Journal**, Oxford, v. 41, n. 5, p. 948-957, 2005.

WILDENSCHILD, D.; HOPMANS, J. W.; VAZ, C. M. P.; RIVERS, M. L.; RIKARD, D. Using x-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions and limitations. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 267, p. 285-297, 2002.

WILLIAMS, K. A.; NELSON, P. V. Using precharged zeolite as a source of potassium and phosphate in a soilless container medium during potted chrysanthemum production. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 122, n. 5, p. 703-708, 1997.

WRAITH, J. M.; OR, D. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software, **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, Madison, v. 27, p. 13-19, 1998.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.