

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Estudo de Alguns Fatores que Podem Afetar a Durabilidade de  
Misturas Solo-Cal**

**Eduardo Suliman Bueno**

Porto Alegre  
2011

EDUARDO SULIMAN BUENO

**ESTUDO DE ALGUNS FATORES QUE PODEM AFETAR A  
DURABILIDADE DE MISTURAS SOLO-CAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre  
2011



**EDUARDO SULIMAN BUENO**

**ESTUDO DE ALGUNS FATORES QUE PODEM AFETAR A  
DURABILIDADE DE MISTURAS SOLO-CAL**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, na área de Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 10 de junho de 2011

Prof. Washington Perez Núñez  
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil  
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Antônio Fortunato Marcon (UFSC)**  
D.Sc. pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Brasil

**Prof. Luciano Pivoto Specht (UFSM)**  
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS), Brasil

**Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)**  
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Brasil

**Profª. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)**  
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS), Brasil

Venham fazer tijolos e queimá-los ao fogo e os usemos em  
lugar de pedras.

*Genesis, Cap. XI, versículo 3*

*À minha amada mãe, minha guia, e  
a meu amado pai, meu mestre.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a meus pais, Euclides e Eva, pelo carinho, amor, confiança, incentivo e apoio incondicional, não apenas durante este trabalho, mas em toda minha vida.

Agradeço imensamente ao Prof. Washington Perez Núñez, orientador deste trabalho, pela atenção dedicada, os conselhos dados, as horas dedicadas a me acompanhar (inclusive aos sábados ao meio-dia) e principalmente pelo auxílio na escolha do tema desta dissertação. Agradeço também sua amizade, sua confiança em mim depositada e seu exemplo de caráter e profissionalismo.

A família Katzor, vô Hélcio, vó Cláudia, tio Kléber, tio Sílvio, sogro e sogra Wilton e Kelly, cunhada Bianca, e principalmente a minha namorada Bruna, pelo carinho, atenção e paciência dedicados.

Agradeço aos meus familiares do coração, vó Tonha, vó Mantina e todas minhas avós “emprestadas”. Minha irmã Maria Solange, minha outra irmã e também comadre Magali e o compadre Nininho, agradeço por tudo, pela confiança em mim e pela consideração por meus pais.

Registro meu agradecimento ao Eng<sup>o</sup> Rodrigo Silveira Lovato, que com seus estudos norteou a realização desta pesquisa.

Ao professor Luciano Pivoto Specht, pelo incentivo e compreensão, desde minha graduação. Saiba que lhe agradeço por toda ajuda, atenção e principalmente pela inserção ao maravilhoso mundo da Geotecnia.

Agradeço ao CNPq e à CAPES pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação aos meus estudos para alcançar esta conquista.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelos ensinamentos ministrados.

Aos funcionários da Escola de Engenharia da UFRGS, em especial ao Jair da Silva, meu “chefe” no laboratório, à Carmem, Ana Luiza e Liliane, minhas grandes amigas na secretaria do PPGEC.

Agradeço ao DNIT, na figura do Eng<sup>o</sup> José Antônio Echeverria, pela disposição de equipamentos e logística para a coleta e transporte dos solos estudados.

Aos colegas de mestrado, Matheus Nogueira, Gracieli Dienstmann, João Bonzanini, Marcelo Heidemann e Camilo Muñoz, agradeço pela amizade e companheirismo durante este período de convivência.

Aos bolsistas de iniciação científica Cléber Pinto, Rodrigo Weber e Douglas pela ajuda na moldagem dos corpos-de-prova empregados nesta dissertação, sem a ajuda de vocês este trabalho seria incrivelmente mais difícil.

Aos demais amigos da UFRGS, João Rodrigo, Manu, Amanda, Luizmar, Caberlon, Fonini, José, Daniel, Vinícius, Lisi, Suzana e demais amigos e bolsistas dos laboratórios por onde passei, lhes agradeço.

Agradeço os professores Luiz Carlos e João Campagnolo por permitirem o uso da câmara úmida do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME/UFRGS).

Agradeço aos professores Adriano Bica e Luiz Bressani por permitirem a utilização dos equipamentos do Laboratório de Geotecnologia (LAGEOTEC/UFRGS).

Aos amigos, Lenon Devos, Luciano, Dai, Cheila, Luciara, Nise, seu Valdir, seu Manuel, Franco, André, Jake, Élide entre tantos que poderiam ser citados aqui, agradeço pela amizade e pelos momentos de conversa e descontração.

Aos meus amigos e colegas de graduação que deixei em Ijuí/RS, saudades.

Enfim, agradeço a todos que de uma forma ou outra participaram desta dissertação, seja “geotecnicamente”, descontraidamente ou amigavelmente, cada um deixou, de uma forma ou de outra, um pouco de si neste trabalho.

## RESUMO

BUENO, E. S. **Estudo de Alguns Fatores que Podem Afetar a Durabilidade de Misturas Solo-Cal.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O desenvolvimento sustentável impõe uma evolução do contexto sócio-econômico das obras que envolvem o uso do solo. Um efeito é a obrigação do uso de materiais localizados na obra ou nas imediações. Isto muitas vezes implica no uso de materiais de baixas propriedades de engenharia, surgem então alternativas de melhoria destes materiais, como a estabilização com cal. No entanto, sabe-se que o tratamento de solos pode ser ineficaz quando da presença de compostos químicos deletérios no solo. Esta dissertação apresenta resultados de um estudo laboratorial do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal cálcica e com cal dolomítica. Para avaliar a influência de agentes químicos, foram usados quatro tipos de fertilizantes químicos de uso comum na agricultura. O estudo incluiu a caracterização do solo, ensaios de compactação, difratometria de Raios-X e compressão simples do solo e das misturas solo-cal e solo-cal contaminado com fertilizante. Foram adotados teores de 1% de fertilizante e 4% de cal, os tempos de cura foram de 7, 14, 28, 56, 112 e 140 dias sob duas condições: cura em câmara sem controle de umidade e cura em câmara úmida a fim de avaliar a influência da perda de umidade sobre o ganho de resistência. Os resultados demonstraram que a adição de fertilizantes químicos diminuiu o ganho de resistência em até 13% em misturas com fertilizantes nitrogenados e cal dolomítica e até 36% em misturas com fertilizantes não-nitrogenados e cal cálcica. O ganho de resistência com cal cálcica foi o dobro do ganho com cal dolomítica, considerando os maiores valores observados. As misturas com cal dolomítica sujeitas à cura úmida tiveram maiores ganhos em todos os tempos de cura, apesar de pouco significativos; as misturas de cal cálcica tiveram maiores ganhos quando da cura em câmara sem controle de umidade, chegando a 60kN/m<sup>2</sup> a mais aos 56 dias. Em todos os ensaios de difratometria nas amostras de solo-cal e solo-cal contaminado com fertilizante observou-se a formação de calcita, em menor quantidade quando da contaminação por fertilizante. Verificou-se que a adição de fertilizantes ao solo pode alterar as características de estabilização do solo, o uso de cal cálcica traz maiores ganhos e que a perda de umidade e o controle da temperatura de cura pouco influenciam nos ganhos de resistência.

Palavras-chave: estabilização de solos; solo-cal; fertilizantes químicos.

## ABSTRACT

BUENO, E. S. **Study of Some Factors That May Affect Durability of Soil-Lime Mixtures.** 2011. M.Sc. Dissertation – Department of Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

Sustainable development requires an evolution of the socio-economic development of the works involving land use. One effect is the obligation of using materials found on site or nearby. This often involves the use of materials of low engineering properties, improvement alternatives arise then these materials such as lime stabilization. However, it is known that the soil treatment may be ineffective in the presence of harmful chemicals in the soil. This thesis presents results of a laboratory study of mechanical behavior of a lateritic soil stabilized with calcic lime and with dolomitic lime. To assess the influence of chemical agents were used four types of commonly used chemical fertilizers in agriculture. The study included the characterization of soil, compaction tests, X-ray diffraction and unconfined compression tests (UCS) of soil and soil-lime and soil-lime contaminated fertilizer. The adopted levels was 1% of fertilizer and 4% lime, the cure times were 7, 14, 28, 56, 112 and 140 days under two conditions: curing in chamber without control of humidity and cure in a moist chamber to assess the influence of moisture loss humidity on the gain of resistance. The results showed that the addition of chemical fertilizers decreased the resistance in up to 13% in mixtures with nitrogen fertilizers and dolomitic lime and 36% in mixtures with nitrogenous fertilizers and calcic lime. The gain in strength with calcic lime was double the gain with dolomitic lime, whereas the highest values observed. Mixes with dolomitic lime be subject to wet cure had greater gains in all curing times, though insignificant, the mixtures of calcic lime had higher gains when the curing chamber without control of humidity, up to 60kN / m<sup>2</sup> more to 56 days. In all diffraction tests of soil samples with lime and lime-soil-fertilizer observed the formation of calcite, a lesser amount when the contamination by fertilizer. It was found that adding fertilizer to soil can alter the characteristics of soil stabilization, the use of calcic lime brings greater gains, and the loss of humidity of the moisture and temperature control of cure little influence on gains in strength.

Key-words: soil stabilization, soil-lime, chemical fertilizers.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	22
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA .....	22
1.2 OBJETIVOS .....	24
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	26
2.1 LATOSSOLOS DA REGIÃO DE CRUZ ALTA/RS .....	26
2.2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS .....	30
2.2.1 Tipos de Estabilização .....	32
2.2.1.2 Estabilização Mecânica .....	32
2.2.1.3 Estabilização Química .....	33
2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL .....	35
2.3.1 A Cal .....	36
2.3.2 Reações solo-cal .....	39
2.3.2.1 Troca catiônica .....	39
2.3.2.2 Floculação - aglomeração .....	41
2.3.2.3 Reações pozolânicas .....	42
2.3.2.4 Carbonatação .....	46
2.3.3 Variáveis do comportamento solo-cal .....	47
2.3.3.1 Efeito da Cal .....	48
2.3.3.2 Efeito do Solo .....	49
2.3.3.3 Efeito da Densidade e Compactação .....	50
2.3.3.4 Efeito do Teor de Umidade e da Relação Água/Cal .....	51
2.3.3.5 Efeito do Tempo de Cura .....	52
2.3.3.6 Efeito da Relação Vazios/Cal .....	53
2.3.3.7 Efeito da Temperatura .....	54
2.3.4 Propriedades do solo estabilizado com cal .....	56

2.3.4.1	Características de compactação .....	56
2.3.4.2	Resistência à Compressão Simples.....	58
2.3.5	Um comportamento inesperado ao estabilizar-se um latossolo com cal – a pesquisa realizada por Lovato (2004).....	59
2.4	FERTILIZANTES.....	60
2.4.1	Fertilizantes minerais.....	61
2.4.2	Fertilizantes orgânicos .....	62
2.5	EFEITOS DELETÉRIOS DE COMPOSTOS QUÍMICOS NO SOLO ESTABILIZADO.....	63
2.5.1	Efeito da matéria orgânica .....	64
2.5.2	Efeito de sulfatos .....	65
2.5.3	Efeito de nitratos .....	67
2.5.4	Efeito de fosfatos.....	68
2.5.5	Efeito da contaminação do solo com fertilizantes químicos.....	69
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	71
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	71
3.2	MÉTODOS .....	73
3.2.1	Coleta das Amostras .....	73
3.2.2	Preparação das Amostras .....	73
3.2.3	Ensaio de Caracterização.....	74
3.2.4	Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova.....	74
3.2.5	Ensaio de Resistência à Compressão Simples .....	76
3.2.6	Ensaio de Difractometria de Raios-X .....	77
3.3	MATERIAIS.....	79
3.3.1	Solo .....	79
3.3.1.1	– Características do solo.....	82
3.3.2	– Cal.....	85
3.3.3	– Água.....	85

3.4 PROGRAMA DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES .....	85
3.4.1 – Dosagem das Misturas .....	86
3.4.1.1 – Definição do Teor de Cal .....	86
3.4.1.2 – Definição do Teor de Fertilizante .....	86
3.4.1.3 – Definição do Tempo de Cura .....	86
3.4.2 – Programa de Ensaios.....	86
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	89
4.1 CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO .....	89
4.2 EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO ESTABILIZADO.....	90
4.2.1 Influência do tipo de cal e do tempo de cura no solo não contaminado .....	94
4.2.2 Influência do tipo de cura .....	97
4.2.3 Influência da contaminação com fertilizante na resistência à compressão simples do solo estabilizado.....	103
4.2.3.1 Efeito da formação de nitratos.....	108
4.2.3.2 Efeito da formação de fosfatos .....	109
4.3 COMPARAÇÃO COM OUTRO LATOSSOLO DA MESMA REGIÃO .....	110
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	114
5.1 CONCLUSÕES .....	114
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	117
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
APÊNDICE A – DADOS DOS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS À COMPRESSÃO SIMPLES .....	129

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ocorrência de Latossolos no Rio Grande do Sul (Fonte: Ministério da Agricultura – DNPEA, 1973).....	28
Figura 2.2 – Mapa pedológico da região de Cruz Alta/RS (Fonte: Embrapa – CNPS, 1999) .	30
Figura 2.3 – Mecanismo de troca de cátions (Fonte: Prusinski & Bhattacharja, 1999) .....	40
Figura 2.4 – Mudança textural ocorrida devido ao fenômeno da troca de cátions seguido pela floculação e aglomeração (Little, 1995).....	41
Figura 2.5 – Mecanismo de estabilização solo-cal (Fonte: Ingles e Metcalf, 1972) .....	43
Figura 2.6 – Esquema de fatores que influenciam as reações solo-cal (GUIMARÃES, 2002). .....	48
Figura 2.7 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (adaptado de INGLES E METCALF, 1972) .....	52
Figura 2.8 – Relação vazios/cimento pela resistência à compressão simples (adaptado de LARNACH, 1960).....	53
Figura 2.9 – Influência da temperatura e do tempo de cura na resistência de misturas de solo e cal (PINTO, 1985). .....	55
Figura 2.10 – efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (adaptado de INGLES E METCALF, 1972) .....	58
Figura 2.11 – Evolução da resistência à compressão simples com o tempo de cura (solo + cal cálcica) (Fonte: Lovato, 2004).....	60
Figura 3.1 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples .....	77
Figura 3.2 – Condições geométricas para a difração de raios-x de acordo com a Lei de Bragg (Fonte: Mitchell, 1976) .....	78
Figura 3.3 – Perfil típico de Latossolo Vermelho Aluminoférrico Típico da região de Cruz Alta/RS (Fonte: Streck <i>et al.</i> , 2002).....	80
Figura 3.4 – Mapa de localização do local de amostragem (Fonte: DAER/RS – Mapa Rodoviário 2001) .....	81
Figura 3.5 – Mapa pedológico da região de Cruz Alta/RS (Fonte: Embrapa – CNPS, 1999) .	81
Figura 3.6 – Distribuição granulométrica do solo .....	82
Figura 3.7 – Curva de compactação do solo .....	83
Figura 3.8 – Difratogramas de raios-x do solo .....	84
Figura 3.9 – Curva de Compactação Solo + Cal .....	87

Figura 4.1 – Curvas de compactação (solo e solo-cal) .....	89
Figura 4.2 – Evolução da RCS das misturas com cal cálcica em função do tempo de cura....	92
Figura 4.3 – Evolução da RCS das misturas com cal dolomítica em função do tempo .....	93
Figura 4.4 – Padrão característico de ruptura dos corpos-de-prova submetidos à compressão simples.....	93
Figura 4.5 – Variação da RCS para cada tipo de cal .....	94
Figura 4.6 – Difractometria de raios-X do solo .....	95
Figura 4.7 – Difractometria de raios-X da mistura solo-cal cálcica.....	95
Figura 4.8 – Difractometria de raios-X da mistura solo-cal dolomítica .....	96
Figura 4.9 – Evolução da RCS de misturas solo-cal cálcica em função do tipo e tempo de cura .....	98
Figura 4.10 – Evolução da RCS de misturas solo-cal dolomítica em função do tipo e tempo de cura.....	98
Figura 4.11 – Difractometria de raios-X da mistura solo-cal cálcica de cura em câmara sem controle de umidade .....	99
Figura 4.12 – Variação do grau de saturação da mistura solo-cal cálcica de cura em câmara sem controle de umidade .....	100
Figura 4.13 – Variação do grau de saturação da mistura solo-cal cálcica de cura dentro de câmara úmida.....	101
Figura 4.14 – Variação do grau de saturação da mistura solo-cal dolomítica de cura em câmara sem controle de umidade.....	102
Figura 4.15 – Variação do grau de saturação da mistura solo-cal dolomítica de cura dentro de câmara úmida.....	102
Figura 4.16 – Evolução RCS das misturas com cal cálcica em função do tempo de cura.....	104
Figura 4.17 – Evolução RCS das misturas com cal dolomítica em função do tempo de cura	104
Figura 4.18 – Difractometria de raios-X da mistura solo-cal cálcica-fertilizante (00-25-25) .	106
Figura 4.19 – Difractometria de raios-X da mistura solo-cal dolomítica-fertilizante (00-25-25) .....	106
Figura 4.20 – Variação do pH em função do aumento do teor de fertilizante .....	107
Figura 4.21 – RCS solo siltoso + nitratos + cimento (Fonte: Borgne <i>et al.</i> , 2008).....	108
Figura 4.22 – RCS solo siltoso + fosfatos + cimento (Fonte: Borgne <i>et al.</i> , 2008) .....	109

Figura 4.23 – Perfil típico de latossolo vermelho da região de Cruz Alta/RS (Fonte: Streck et al., 2002).....	111
Figura 4.24 – RCS obtidas no estudo do segundo solo.....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Guia para escolha do tipo de estabilização mais efetiva (IFG, 2005).....	34
Tabela 2.2 – Composição média das cales brasileiras (Guimarães, 2002) .....	38
Tabela 2.3 - Exigências químicas e físicas para comercialização das cales hidratadas (NBR 7175/2003).....	38
Tabela 3.1 – Etapas e ensaios do programa experimental .....	72
Tabela 3.2 – Identificação dos principais argilo-minerais através de Difractometria de raios-x (Fonte: Mitchell, 1976) .....	79
Tabela 3.3 – Análise química total do solo .....	84
Tabela 3.4 – Análise química das cales utilizadas.....	85
Tabela 4.1 – Características de compactação do solo e da mistura solo-cal.....	89
Tabela 4.2 – Evolução da resistência à compressão simples de misturas de solo contaminado e cal cálcica (kN/m <sup>2</sup> ).....	91
Tabela 4.3 – Evolução da resistência à compressão simples de misturas contaminadas e cal dolomítica (kN/m <sup>2</sup> ) .....	91
Tabela 4.4 – RCS da mistura solo-cal cálcica-fertilizante .....	110
Tabela A.1 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal .....	130
Tabela A.1 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal .....	130
Tabela A.2 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica de cura em câmara úmida.....	131
Tabela A.2 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica de cura em câmara úmida .....	131
Tabela A.3 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica de cura em câmara sem controle de umidade.....	132
Tabela A.3 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cálcica de cura em câmara sem controle de umidade .....	132
Tabela A.4 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica contaminados com fertilizante 05-20-20.....	133
Tabela A.4 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cálcica contaminados com fertilizante 05-20-20.....	133
Tabela A.5 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica contaminados com fertilizante 00-20-20.....	134

Tabela A.5 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cálcica contaminados com fertilizante 00-20-20.....	134
Tabela A.6 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica contaminados com fertilizante 00-25-25.....	135
Tabela A.6 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cálcica contaminados com fertilizante 00-25-25.....	135
Tabela A.7 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cálcica contaminados com fertilizante 10-20-10.....	136
Tabela A.7 (continuação)– Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica contaminados com fertilizante 10-20-10.....	136
Tabela A.8 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica de cura em câmara úmida .....	137
Tabela A.8 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica de cura em câmara úmida .....	137
Tabela A.9 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica de cura em câmara sem controle de umidade .....	138
Tabela A.9 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com dolomítica de cura em câmara sem controle de umidade .....	138
Tabela A.10 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica contaminados com fertilizante 05-20-20.....	139
Tabela A.10 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com dolomítica contaminados com fertilizante 05-20-20 .....	139
Tabela A.11 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica contaminados com fertilizante 00-20-20.....	140
Tabela A.11 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com dolomítica contaminados com fertilizante 00-20-20 .....	140
Tabela A.12 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica contaminados com fertilizante 00-25-25.....	141
Tabela A.12 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com dolomítica contaminados com fertilizante 00-25-25 .....	141
Tabela A.13 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica contaminados com fertilizante 10-20-10.....	142
Tabela A.13 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com dolomítica contaminados com fertilizante 10-20-10 .....	142

Tabela A.14 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário .....	143
Tabela A.14 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário .....	143
Tabela A.15 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica de cura em câmara úmida .....	144
Tabela A.15 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica de cura em câmara úmida .....	144
Tabela A.16 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica de cura em câmara sem controle de umidade .....	145
Tabela A.16 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com dolomítica de cura em câmara sem controle de umidade .....	145
Tabela A.17 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica contaminados com fertilizante 05-20-20.....	146
Tabela A.17 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com dolomítica contaminados com fertilizante 05-20-20 .....	146
Tabela A.18 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica contaminados com fertilizante 00-20-20.....	147
Tabela A.18 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com dolomítica contaminados com fertilizante 00-20-20 .....	147
Tabela A.19 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica contaminados com fertilizante 00-25-25.....	148
Tabela A.19 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com dolomítica contaminados com fertilizante 00-25-25 .....	148
Tabela A.20 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica contaminados com fertilizante 10-20-10.....	149
Tabela A.20 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com dolomítica contaminados com fertilizante 10-20-10 .....	149

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
CNPS	Centro Nacional de Pesquisa de Solos
CTC	Capacidade de troca catiônica
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPEA	Departamento Nacional de Pesquisa e Experimentação Agropecuárias
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Ia	Índice de atividade de argilas
IFG	International Focus Group on Rural Road Engineering
IP	Índice de plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
$k_i$	Relação molecular sílica/alumina
$k_r$	Relação molecular sílica/sexquióxidos
LA'	Grupo de solos da classificação MCT
LAGEOTEC	Laboratório de Geotecnologia
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LEME	Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais
LG'	Grupo de solos da classificação MCT
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
LVd2	Grupo de classificação pedológica de solos
LVaf	Grupo de classificação pedológica de solos

MCT	Miniatura, compactado, tropica; designação de uma metodologia de ensaios geotécnicos
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NLA	National Lime Association (EUA)
N-P-K	Teores de Nitrogênio, Fósforo e Potássio respectivamente, empregados nos fertilizantes químicos comercializados
pH	Potencial hidrogeniônico
TRB	Transportation Research Board
RCS	Resistência à compressão simples
RTCD	Resistência à tração por compressão diametral
USCS	Unified Soil Classification System
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso específico aparente seco máximo
$\omega$	Teor de umidade
$\omega_{\acute{o}t}$	Teor de umidade ótimo

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

Os objetivos do desenvolvimento sustentável impõem uma evolução do contexto sócio-econômico das obras que envolvem o uso do solo. Um dos efeitos mais notáveis é a obrigação de utilizar exclusivamente os materiais localizados na obra ou nas imediações, seja qualquer tipo de obra de terra, aterros, estradas, terraplenagens, etc. Este requisito muitas vezes implica no uso de materiais de com propriedades de engenharia insatisfatórias. Uma possibilidade para melhorar o comportamento destes materiais é a estabilização do solo com cal ou cimento. No entanto, sabe-se que o tratamento destes solos pode ser ineficaz quando da presença de compostos químicos deletérios no solo (CUISINIER *et al.*, 2010; BENARD *et al.*, 2008; SHERWOOD, 1962; WANG *et al.*, 2003; HARRIS *et al.*, 2004; BHATTACHARJA *et al.*, 2003; PETRY & LITTLE, 1992; HUNTER, 1988; MITCHELL, 1986).

Atualmente, diante da busca cada vez maior por soluções de menor custo e que visem a preservação dos recursos naturais, a estabilização de solos surge como uma boa alternativa ao emprego de britas, tradicionalmente usadas em camadas de pavimentos. O processo de estabilização de solos conduz a estruturas de pavimentos com bom desempenho e durabilidade.

A busca por materiais alternativos para uso na construção de pavimentos justifica-se pelo fato de que o setor rodoviário é responsável por mais de 70% das cargas transportadas no Brasil, bem como pela extensão das estradas públicas vicinais. Associa-se a esse fato a necessidade de que as rodovias sejam trafegáveis durante todo o ano com qualidade e segurança, diminuindo, assim, o número excessivo de acidentes nas estradas, danos à frota nacional de veículos e ao meio ambiente.

O termo "estabilização do solo" corresponde a qualquer processo, natural ou artificial, pelo qual um solo, sob o efeito de cargas aplicadas, se torna mais resistente à deformação e ao deslocamento, do que o solo original. Tais processos consistem em modificar as

características do sistema solo-água-ar com a finalidade de se obter propriedades de longa duração compatíveis com uma aplicação particular (HOUBEN & GUILLAUD, 1994).

Contudo, a estabilização de solos enfrenta várias limitações, especialmente quando o solo contém uma quantidade significativa de compostos que podem alterar os efeitos da cal. Os compostos químicos mais conhecidos por alterarem a estabilização química de solos são os sulfatos e a matéria orgânica. No entanto, vários casos de falha de estabilização do solo têm sido relatados por pesquisadores em solos sem sulfatos ou sem matéria orgânica. Nestes casos, outros compostos são considerados para explicar essas falhas, como os contidos nos fertilizantes agrícolas (nitratos e fosfatos).

No entanto, existem poucos dados disponíveis na literatura sobre os reais efeitos desses compostos na estabilização do solo. Neste contexto, não é possível concluir se a presença de fertilizantes agrícolas (sulfatos, nitratos e fosfatos) ou cloretos em um solo podem explicar falhas no processo de estabilização do solo. Além disso, se esses compostos são capazes de alterar a estabilização do solo, é necessário determinar o limiar de concentração acima do qual um composto pode ter um impacto negativo sobre a eficácia da estabilização do solo com cal ou cimento. Além disso, é sabido que as condições de cura podem influenciar os processos físico-químicos de estabilização do solo e, conseqüentemente, o desempenho mecânico e expansão do solo estabilizado.

A pesquisa apresentada nesta dissertação visa avaliar quantitativamente a influência de alguns compostos potencialmente deletérios sobre o desempenho mecânico de um latossolo estabilizado com cal. Para isso, vários procedimentos experimentais foram realizados para determinar o desempenho deste solo estabilizado em laboratório. Eles são baseados em várias condições de cura (temperatura e umidade) e parâmetros mecânicos a serem testados (resistência à compressão simples). Estes diferentes procedimentos foram seguidos, para destacar as influências combinadas de temperatura, tempo de cura e umidade sobre os efeitos dos compostos potencialmente deletérios ao processo de estabilização.

Sucintamente, este relato visa estudar e quantificar laboratorialmente as variações da durabilidade, avaliada através da resistência à compressão simples (RCS), de um solo estabilizado com cales cálcica ou dolomítica, considerando-se tempos de cura de até 140 dias. Especificamente analisa-se o efeito dos tipos de cura (dentro de câmara úmida e em câmara

sem controle de umidade) e da contaminação dos solos com fertilizantes de uso frequente e abundante na região de ocorrência do solo que foi estabilizado.

## 1.2 OBJETIVOS

Salientam-se como antecedentes a pesquisa aqui relatada:

- a) A pesquisa realizada por Lovato (2004) envolvendo a estabilização de um solo laterítico da região de Cruz Alta/RS, na qual, após o crescimento inicial significativo da resistência e do módulo de elasticidade, observou-se a queda desses parâmetros para tempos de cura superiores a 56 dias.
- b) A pesquisa realizada na França por Borgne *et al.* (2008), na qual se avaliaram os efeitos da presença de elementos químicos componentes de fertilizantes em solos estabilizados.

A pesquisa narrada nesta dissertação teve como objetivo geral analisar alguns fatores que podem favorecer a redução da resistência de solos estabilizados com cal, ou seja, a durabilidade desses neo materiais.

Como objetivos específicos que nortearam a realização do estudo, citam-se:

- a) A avaliação do efeito do tipo de cura (em câmara úmida e em câmara sem controle de umidade) na evolução da RCS de corpos-de-prova de solos estabilizado com cal;
- b) A avaliação dos efeitos da contaminação do solo com fertilizantes químicos na evolução da RCS do solo estabilizado com cal.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho divide-se em 5 capítulos.

Neste capítulo que é a Introdução, discute-se o problema de pesquisa levantado e a sua relevância, definindo-se igualmente os objetivos geral e específicos desta.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão da literatura, abrangendo aspectos relevantes da estabilização de solos com cal, dando ao leitor uma visão geral sobre o tema, os materiais e os métodos empregados. Assim, os principais aspectos abordados são o comportamento típico esperado, os processos químicos envolvidos, a descrição dos materiais utilizados e os fatores que podem influenciar no processo de estabilização.

No capítulo 3 é dado ênfase aos procedimentos experimentais usados no desenvolvimento da pesquisa, apresentando os materiais empregados e os métodos aplicados.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na etapa experimental, bem como, uma discussão detalhada dos resultados, levando em conta outros resultados encontrados na literatura.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 LATOSSOLOS DA REGIÃO DE CRUZ ALTA/RS

Sabe-se que o solo é recurso natural lentamente renovável, encontrado em diferentes posições na paisagem. Sua origem resulta da sedimentação de partículas carregadas pela água ou pelo vento (solos sedimentares) ou da intemperização de rochas *in situ*. No Rio Grande do Sul, a combinação da diversidade geológica, climática e de relevo originou uma grande variedade de tipos de solos que contribuiriam para os diferentes padrões de ocupação das terras, do seu uso agrícola e do desenvolvimento regional. Considerando esses vários aspectos, os solos podem ser definidos como corpos naturais que recobrem a superfície terrestre, constituídos por materiais minerais e orgânicos, que contém organismos vivos e apresenta potencial para o desenvolvimento de vegetação, podendo também ser empregados em trabalhos de engenharia (STRECK *et al.*, 2008).

Os solos recebem designações diversas, conforme a ciência que o estuda. Na área de pavimentação especificamente uma classificação geotécnica bastante utilizada em todo o mundo é a da AASHTO.

Nogami & Villibor (1995) definem solo tropical aquele que apresenta propriedades e comportamento decorrentes de processos geológicos e/ou pedológicos típicos de regiões tropicais úmidas. Os solos tropicais são divididos em duas grandes classes: solos lateríticos e solos saprolíticos.

Para Nogami & Villibor (1983) os solos lateríticos são solos bem intemperizados, característicos de áreas bem drenadas, que ocupam as camadas mais superficiais. Apresentam coloração em que predominam os matizes vermelhos e amarelo, com uma macroestrutura aparentemente homogênea e isotrópica. Sua constituição mineralógica é caracterizada pela presença de quartzo e de outros minerais resistentes mecânica e quimicamente (magnetita, ilmenita, turmalina, zircão) na fração areia. A fração argila é constituída de argilo-minerais (geralmente a caulinita) e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

Os mesmos autores afirmam que os solos saprolíticos são originados pela decomposição e/ou desagregação de uma rocha consolidada e, em condições naturais, constituem camadas subjacentes às lateríticas. Sua macroestrutura se caracteriza pela heterogeneidade e anisotropia, geralmente com cores variadas, manchas e mosqueamentos herdados da rocha matriz ou desenvolvidos pelo intemperismo. Apresentam uma constituição mineralógica variada, que depende do tipo de rocha matriz e de seu grau de intemperização. Na fração areia podem ocorrer minerais como mica e feldspatos e, na fração argila, minerais expansivos da família da illita e da montmorilonita.

Os solos lateríticos, estabilizados ou não, têm ampla utilização na engenharia rodoviária. Segundo Martins *et al.* (2000), estes solos ocorrem em mais de 60% do território brasileiro e geralmente estão presentes no horizonte B de perfis classificados pela pedologia como Latossolos, Podzólicos (atualmente designados como argilossolos) Vermelho Amarelo e Terras Roxas Estruturadas.

Os estudos geotécnicos no meio rodoviário têm se baseado historicamente na geologia. Segundo afirmam Marangon & Motta (2001), a utilização de mapas geotécnicos, obtidos a partir de informações geológicas e pedológicas, possibilita a associação de dados geomecânicos dos solos com os de sua gênese. Essa reunião de dados fornece um índice mais confiável para a organização e troca de conhecimento de informações de regiões distintas, podendo contribuir para a localização de áreas potenciais de ocorrência de materiais a serem explorados.

Entretanto, a correspondência entre características geomecânicas do solo e sua gênese pode ser complexa. Por exemplo, segundo Nogami & Villibor (1983), do ponto de vista geotécnico uma camada poderá ter comportamento laterítico, apesar de não pertencer a um perfil pedológico laterítico e, eventualmente solos que pertençam a um perfil pedológico laterítico podem não ter comportamento geotécnico laterítico.

Os perfis geotécnicos com solos residuais podem ou não apresentar concentração de argila no horizonte B. Quando essa concentração ocorre, e se nota uma clara diferença entre os horizontes A e B, este último (com concentração de argila) é denominado horizonte B textural, característicos de solos Podzólicos ou argilossolos. Entretanto, há casos em que não se observa tal diferença, e o horizonte B recebe a denominação de latossólico, sendo característico dos Latossolos.

Segundo Dias (1989), os solos com horizonte laterítico classificados como Latossolos ocorrem em cerca de 20% do Estado do Rio Grande do Sul, formados por solos oriundos de basalto e arenito. A ocorrência de Latossolos no Estado é caracterizada pela região em vermelho, apresentada na Figura 2.1.

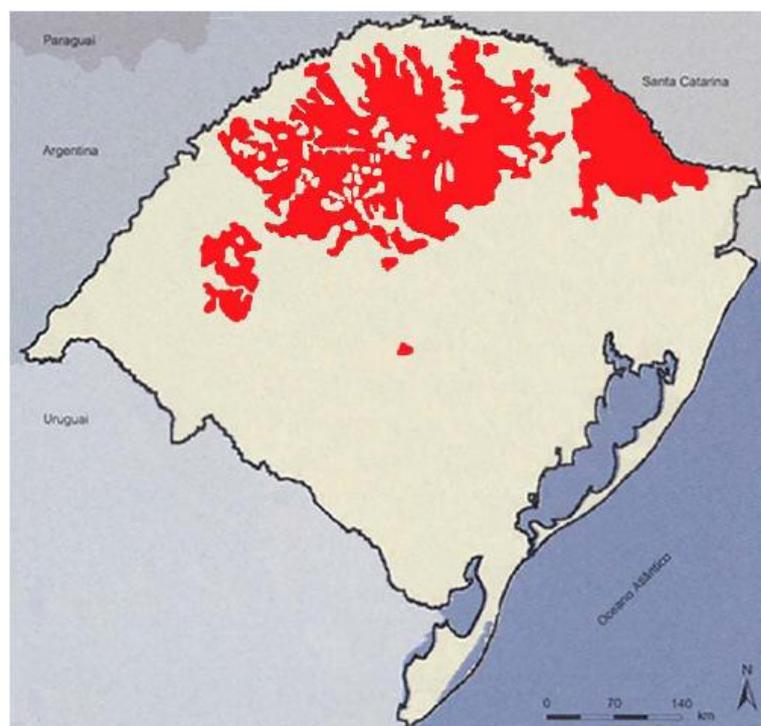


Figura 2.1 – Ocorrência de Latossolos no Rio Grande do Sul (Fonte: Ministério da Agricultura – DNPEA, 1973)

Os Latossolos (solos com horizonte B latossólico) apresentam horizontes A, B e C com pouca diferenciação textural entre os horizontes A e B. O horizonte B, geralmente mais espesso (pelo menos 50cm), é homogêneo, em geral com estrutura do tipo granular, microagregada ou maciça-porosa. A fração argila, com alto grau de flocculação, é constituída predominantemente por óxidos de ferro (hematita e goetita), óxidos de alumínio (gibsitita) e argilo-minerais do grupo 1:1 (caulinita), com baixa relação sílica/sesquióxidos (kr) e baixa capacidade de troca catiônica (SALOMÃO & ANTUNES, 1998).

Klamt (1989) observa que, em geral, solos com elevada capacidade de troca catiônica (CTC) e/ou altos índice ki ( $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ) e kr ( $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) contém argilo-minerais do tipo 2:1, expansivos ou parcialmente expansivos (esmectita ou vermiculita); e os de baixa

capacidade catiônica e índices  $k_i$  e  $k_r$ , contém argilo-minerais do tipo 1:1 e óxidos como caulinita e hematita.

Segundo Martins *et al.* (2000), a região de Cruz Alta caracteriza-se principalmente pela presença do Latossolo Vermelho-Escuro, definido como Latossolo Vermelho distrófico (em pedologia, diz-se distrófico do tipo de solos em que a porcentagem de saturação por bases é inferior a 50%, sendo portanto, bastante ácidos) na classificação atual (EMBRAPA – CNPS, 1999). Este tipo de solo é derivado normalmente do arenito e quando oriundo do basalto da Formação Serra Geral, sofre a influência do arenito da Formação Tupanciretã (Terciário), evidenciado pela presença de grãos de quartzo ao longo dos perfis (DIAS, 1989).

Entretanto, segundo Martins *et al.* (2000), em grandes extensões do Planalto das Missões há ocorrência do Latossolo Roxo (Latosolo Vermelho aluminoférrico na classificação atual), derivado do basalto da Formação Serra Geral. Conforme os autores, este solo apresenta horizonte B latossólico, teores de óxido de ferro superiores a 18%, e relação molecular sílica/alumina ( $k_i$ ) mais elevada. Sua textura é muito argilosa, mas em áreas de contato com os arenitos da Formação Tupanciretã, há um aumento na fração arenosa e os teores de óxidos de ferro são inferiores. Além disso, segundo Gehling *et al.* (1981) a ocorrência de uma fração areia e silte em solo residuais de basalto pode ser resultado de minúsculas amígdalas de quartzo na rocha mãe, de concreções ferruginosas ou de uma contribuição coluvial de solos da Formação Tupanciretã.

De acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (EMBRAPA – CNPS, 1999) a unidade de mapeamento Cruz Alta é caracterizada pelo Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd2). Entretanto, cabe ressaltar que na região citada parece haver uma área de contato da Formação Serra Geral com a Formação Tupanciretã, comprovada pedologicamente também pela presença do Latossolo Vermelho aluminoférrico típico (LVaf) nas proximidades, conforme mostra a Figura 2.2.

Conforme relatório da EMBRAPA - CNPS (1999), o Latossolo Vermelho é constituído por gibsitita, caulinita e teores elevados de óxidos de ferro. Possui poucos grãos de quartzo e minerais opacos, como a ilmenita e magnetita. Tremocoldi (2003) constatou, além da gibsitita, a presença de minerais do tipo interstratificado em alguns tipos de latossolos do Estado de São Paulo. Segundo este autor, estes minerais são provavelmente do tipo vermiculita com Al-hidróxi nas entrecamadas, comuns em solos intemperizados devido à sua estabilidade

estrutural. Alves (2002) também identificou a presença da vermiculita em alguns latossolos no Estado de São Paulo. De acordo com o autor, os resultados concordam com o observado por Potter & Kampf (1981), Fontes & Weed (1991) e Netto (1996) para outros latossolos brasileiros.

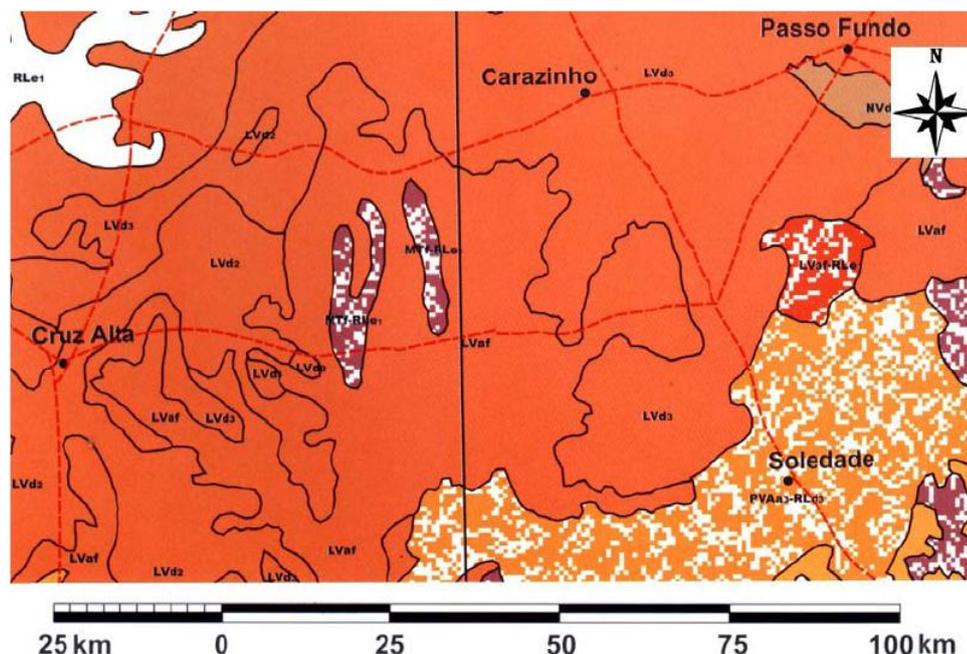


Figura 2.2 – Mapa pedológico da região de Cruz Alta/RS (Fonte: Embrapa – CNPS, 1999)

Godoy *et al.* (1998) observaram uma correlação importante entre as classes pedológicas e os grupos da classificação MCT. Constataram, para alguns latossolos do Estado de São Paulo, que a classe dos Latossolos Roxos apresentou coeficientes  $c'$  elevados ( $>1,68$ ), pertencendo praticamente sempre ao grupo LG' (solos argilosos de comportamento laterítico). Os Latossolos Vermelho-Escuros apresentaram comportamento similar, mas os valores de  $c'$  tenderam a ser menores (aproximando-se de uma transição entre os grupos LG' – LA').

## 2.2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O solo natural apresenta-se como um material complexo e variável, de acordo com sua localização. No entanto, devido à sua ocorrência universal e ao seu baixo custo torna-se um material bastante utilizado em obras de engenharia (NÚÑEZ, 1991).

Na pavimentação rodoviária, especificamente, a racionalização do uso dos materiais locais pode melhorar a qualidade de rolamento das rodovias, resultando em soluções mais econômicas do que as convencionais. Contudo, nem sempre é possível encontrar solos naturais que atendam às exigências das especificações vigentes. Nestas situações, algumas decisões podem ser tomadas em relação à solução mais indicada para cada caso, e possivelmente irá contemplar uma das seguintes hipóteses (MOTTA & MEDINA, 2010):

- a) Evitar o solo ruim ou contornar o terreno mau: por exemplo, adaptar o traçado de uma estrada de modo a contornar uma área pantanosa ou modificar o greide da estrada de modo a evitar uma camada de solo expansivo;
- b) Remover o solo ruim e substituí-lo por outro de boa qualidade, por exemplo, construir aterro de material arenoso com expulsão e dragagem de turfa e argila mole subjacente, ou manter o greide de uma estrada escavando a camada de solo argiloso do subleito;
- c) Projetar a estrutura ou obra de terra para situação de terreno de fundação má (“conviver” com a situação difícil), por exemplo, aterro “flutuante” que recalque e seja renivelado após algum tempo, ou calcular a espessura do pavimento para as condições de solo expansivo do subleito num corte;
- d) Tratar o solo de modo a melhorar suas propriedades mecânicas e susceptibilidade aos efeitos ambientais: por exemplo, pré-comprimindo ou promovendo a drenagem com drenos verticais na argila do subsolo sob um aterro, ou misturando cal ao solo expansivo do subleito de um pavimento.

A última hipótese, apresentada no item “d”, é, segundo Núñez (1991), normalmente designada por estabilização de solos. Essa definição apresenta-se de maneira simples e objetiva. Porém, alguns autores, como Baptista (1976), apresentam a conceituação do processo de estabilização de um material de uma maneira um pouco mais detalhada.

Para Baptista (1976) estabilizar um solo é, de um modo geral, utilizar um processo qualquer de natureza física, físico-química ou mecânica, de maneira a torna-lo estável para os limites de sua utilização, fazendo com que esta estabilidade permaneça sob ações de cargas exteriores e ações climáticas variáveis. O autor complementa sua definição comentando que o processo de estabilização de um solo envolve propriedades de resistência do solo e da suplementação

necessária desta resistência para um determinado uso, em termos mecânicos, físicos, físico-químicos e químicos.

### **2.2.1 Tipos de Estabilização**

As alterações às propriedades de um solo podem ser de ordem química, física e biológica. Contudo, devido à grande variabilidade dos solos nenhum método será bem sucedido em mais do que alguns tipos de solos. De fato, visto que as características de um solo se alteram em intervalos de alguns metros, a escolha de um método de estabilização é normalmente condicionada pelo número e tipo de solos sobre os quais este provou ter uma ação efetiva (CRISTELO, 2001).

De acordo com Guimarães (2002), a estabilização de solos pode ser obtida por várias técnicas, que são reunidas em dois grandes grupos:

- a) as que empregam meios mecânicos: correção da granulometria e da plasticidade através da incorporação ou retirada de determinadas quantidades de frações constituintes do solo, até a obtenção de parâmetros estabelecidos por normas;
- b) as que empregam meios químicos: utilização de aditivos orgânicos ou inorgânicos, como a cal, o cimento Portland, silicatos de sódio, materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo e outros.

De acordo com Marques (2004), devido às disparidades e semelhanças nos processos e mecanismos utilizados para a estabilização de solos, adota-se a natureza da energia transmitida ao solo como um critério para a classificação dos métodos de estabilização. Desta forma podem ser citados os seguintes tipos de estabilização: mecânica, granulométrica, química, elétrica e térmica.

#### **2.2.1.2 Estabilização Mecânica**

A estabilização mecânica visa dar ao solo (ou mistura de solos) a ser usado como camada do pavimento uma condição de densificação máxima relacionada a uma energia de compactação e a uma umidade ótima. Também conhecida como estabilização por compactação. É um método que sempre é utilizado na execução das camadas do pavimento, sendo complementar a outros métodos de estabilização (MARQUES, 2004).

Little (1995) relata que freqüentemente os solos utilizados em obras de pavimentação requerem uma estabilidade mecânica adicional, a fim de propiciar a estes uma maior durabilidade ou a alteração de seus volumes potenciais.

De acordo com Gondim (2008), são considerados métodos de estabilização mecânica os procedimentos que alteram apenas o arranjo das partículas do solo ou a granulometria deste. A autora menciona, ainda, que dentre os métodos existentes se sobressaem à compactação e a estabilização granulométrica.

De acordo com Little (1995), a compactação é a forma de estabilização mais utilizada, sendo responsável pela melhoria da estabilidade mecânica de praticamente todo tipo de solo. Entretanto, o mesmo faz uma ressalva, afirmando que em muitas ocasiões a compactação sozinha não é suficiente, principalmente quando o solo a ser tratado é coesivo ou apresenta uma granulometria fina.

Problemas, como o citado anteriormente por Little (1995), são responsáveis pela busca constante de novas alternativas tecnológicas que possam suprir as limitações de solos utilizados em obras de engenharia. Esse fato faz com que o número de métodos utilizados na estabilização desses materiais aumente consideravelmente a cada dia.

Para Motta & Medina (2010), a estabilização granulométrica consiste na mistura de dois ou mais solos, de forma íntima, e sua posterior compactação. Procura-se obter mistura densamente graduada e de fração fina plástica limitada.

Marques (2004) sugere que a estabilização granulométrica consiste da alteração das propriedades dos solos através da adição ou retirada de partículas de solo. Este método consiste, basicamente, no emprego de um material ou na mistura de dois ou mais materiais, de modo a se enquadrarem dentro de uma determinada especificação.

#### 2.2.1.3 Estabilização Química

Para Marques (2004), a estabilização química quando utilizada para solos granulares visa principalmente melhorar sua resistência ao cisalhamento (causado pelo atrito produzido pelos contatos das superfícies das partículas) por meio de adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos. Os ligantes mais utilizados são o cimento Portland, cal junto a pozolanas (como as cinzas volantes), materiais betuminosos, resinas, etc.

Documento do International Focus Group on Rural Road Engineering – IFG (2005) relata que o processo de estabilização química envolve a adição de um agente estabilizante ao solo fazendo com que este atinja uma umidade ótima adequada, uma compactação eficiente e uma cura final que assegure a obtenção de uma resistência potencial satisfatória.

O IFG (2005) destaca ainda o uso da cal e do cimento na melhoria de solos naturais instáveis, a fim de possibilitar seu uso em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Este documento apresenta um critério de escolha, entre os dois estabilizantes, baseado na plasticidade e no tamanho das partículas distribuídas no material a ser tratado, como mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 – Guia para escolha do tipo de estabilização mais efetiva  
(IFG, 2005)

TIPO DE ESTABILIZAÇÃO	Propriedades do Solo					
	Mais que 25% passando na peneira 0,075mm			Menos que 25% passando na peneira de 0,075mm		
	IP ≤ 10	10 < IP < 20	IP ≥ 20	IP ≤ 6 LP ≤ 60	6 < IP ≤ 10	IP > 10
Cimento	Sim	Sim	*	Sim	Sim	Sim
Cal	*	Sim	Sim	Não	*	Sim

Outro método de estabilização química de solos conhecido no âmbito rodoviário é o que emprega materiais betuminosos. De acordo com Senço (2001) este processo de estabilização ocorre ao se adicionar um material betuminoso a um solo, ou misturas de solos, a fim de melhorar as propriedades destes.

Guimarães (2002) comenta que a opção por um ou outro método de estabilização seja ela mecânica ou com a inserção de aditivos químicos, como a cal e o cimento, é influenciada por uma série de fatores, entre os quais destacam-se: os econômicos, a própria finalidade da obra, as características dos materiais e as propriedades do solo que devem ser corrigidas. Além disso, o autor relata que os solos das regiões tropicais úmidas, particularmente, recebem tratamentos deficientes sobre seus problemas devido às significativas diferenças entre suas propriedades e comportamento, exigindo um número maior de estudos e pesquisas para se chegar aos procedimentos mais apropriados.

## 2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

Azevedo *et al.* (1998) definem a mistura de solo-cal como sendo uma mistura íntima de solo, cal e água em proporções determinadas através de ensaios laboratoriais. Segundo os autores a aplicação dessa técnica é fundamentada em reações químicas e físico-químicas que ocorrem entre a cal e os constituintes do solo, principalmente com a fração argila.

O uso da cal, de acordo com Santos (2004), é recomendado para melhoria de solos argilosos ou muito siltosos, que apresentem em geral plasticidade e expansão elevadas, além de baixa capacidade de suporte. Segundo Little (1999), o tratamento desses solos com a cal pode ser classificado de duas maneiras:

- a) solo modificado pela cal: é um processo que ocorre entre os grãos finos do solo e a cal e que apresenta, para solos argilosos de moderada a alta plasticidade, melhorias substanciais como: redução da plasticidade, redução na susceptibilidade à água e melhorias na estabilidade e trabalhabilidade do solo. De acordo com o autor, esse processo ocorre inicialmente devido a troca de cátions de cálcio fornecidos pela cal ( $\text{Ca(OH)}_2$  ou cal hidratada) por cátions presentes no solo, normalmente adsorvidos na superfície do argilo-mineral, e desenvolve-se em um ambiente com um pH elevado, promovido pelo sistema cal-água.
- b) solo estabilizado pela cal: o processo de estabilização difere do processo de modificação devido ao ganho significativo de resistência, obtido com o passar do tempo, que ocorre em função do desenvolvimento, a longo prazo, da reação pozolânica. De acordo com Little (1999), essa reação é representada pela formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, produzidos a partir das reações entre o cálcio da cal e os aluminatos e silicatos solubilizados na superfície do argilo mineral. A reação pozolânica pode ser iniciada rapidamente, sendo responsável por alguns dos efeitos do processo de modificação. Contudo, de acordo com Azevedo *et al.* (1998), esta reação pode se estender por muitos anos desde que, como relata Little (1999), esteja presente na mistura uma quantidade suficiente da cal para sua ocorrência e que o pH remanescente permaneça elevado. Little (1999) comenta ainda, que o

sucesso da reação pozolânica está diretamente relacionado com a reatividade do solo tratado e com o desenvolvimento de um bom projeto para a mistura, podendo, quando obedecido esses parâmetros, apresentar resultados mais eficazes à amostra estabilizada, ou seja, melhorar substancialmente a capacidade de suporte desta. Estes resultados podem compreender: o aumento dos valores do módulo de resiliência (de um fator de 10 ou mais), melhorias na resistência ao cisalhamento (de um fator de 20 ou mais), ganhos contínuos de resistência e durabilidade, mesmo sobre os efeitos da variação climática ou danos por carregamento (LITTLE, 1995).

Dias (2004) comenta que o processo de modificação precisa de um teor baixo da cal adicionado ao solo, sendo suficiente apenas para desenvolver as reações imediatas ou da fase rápida, sem desenvolver as reações lentas (cimentantes) ou pozolânicas. Já em relação ao processo de estabilização o autor relata que o teor da cal adicionado é tal, que propicia a ocorrência das reações da fase rápida e da fase lenta. Conforme Azevedo et. al. (1998) este processo é utilizado quando a necessidade de melhorias de um solo é basicamente estrutural.

### **2.3.1 A Cal**

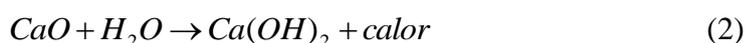
Pela multiplicidade de suas aplicações, a cal – virgem e hidratada – está entre os dez produtos de origem mineral de maior consumo mundial. O produto ganha ainda maior expressão quando se conhece o amplo leque de setores industriais e sociais que dele se utilizam, graças à sua dupla capacidade – reagente químico e aglomerante-ligante (CUNHA, 2007).

A cal é um aglomerante resultante da calcinação de rochas carbonatadas constituídas predominantemente por carbonato de cálcio e/ou carbonato de cálcio e magnésio. Segundo Guimarães (2002), o resultado da calcinação dos carbonatos de cálcio e de cálcio-magnésio é, respectivamente, o óxido de cálcio (CaO) e o cálcio-magnésio (CaO – MgO), denominados genericamente de cal virgem ou cal viva.

Segundo Oliveira (2001), na calcinação do calcário natural o carbonato de cálcio é decomposto em óxidos de cálcio (CaO) e anidridos carbônicos (CO<sub>2</sub>) após ser submetido a uma temperatura aproximada de 900°C. A cal virgem fornecida por este processo é bastante utilizada na estabilização de solos instáveis, sendo empregada quando o solo é muito úmido (umidade além do ponto ótimo), servindo para secá-lo (Guimarães, 2002). Contudo, conforme Azevedo *et. al.* (1998), a aplicação dessa cal exige muitos cuidados com a segurança dos

trabalhadores e, dessa forma, em alguns países, como o Brasil e os Estados Unidos, o seu uso vem sendo substituído gradativamente pela cal hidratada que oferece maior segurança aos seus operadores

A cal hidratada, obtida pela hidratação da cal viva, é encontrada na forma de pó seco, com 17% a 19% de água combinada (Guimarães, 2002). Esta cal é classificada, de acordo com a norma NBR 7175 (2003) da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em função de sua composição química, como: CH I, CH II e CH III. Azevedo et al. (1998) comentam que a diferença principal entre esses tipos de cales encontra-se nos teores de cálcio (maiores, tanto mais próxima a cal do CH I) e nos teores de carbonatos (menores, tanto mais próxima a cal do CH I). As reações de formação da cal virgem e da cal hidratada respectivamente, são representadas pelas equações 1 e 2.



Chama-se cal cálcica o produto obtido pela reação de hidratação mostrada acima. A partir da calcinação do calcário dolomítico, obtém-se a cal dolomítica, que é uma mistura de óxido de cálcio e óxido de magnésio (CaO + MgO). Assim, pode-se ter os seguintes tipos de cal:

- a) CaO → cal cálcica virgem;
- b) CaO . MgO → cal dolomítica virgem;
- c) Ca(OH)<sub>2</sub> → cal cálcica hidratada;
- d) Ca(OH)<sub>2</sub> . MgO → cal dolomítica mono-hidratada;
- e) Ca(OH)<sub>2</sub> . Mg(OH)<sub>2</sub> → cal dolomítica bi-hidratada.

Conforme Guimarães (2002), as cales comercializadas no mercado brasileiro apresentam propriedades com valores médios mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.2 – Composição média das cales brasileiras (Guimarães, 2002)

TIPO DE CAL	CaO (%)	MgO (%)	Insolúvel no HCl (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Perda ao Fogo (%)	CO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO + MgO Base de Não-Volátil (%)	MgO Não Hidratado (%)
CAL VIRGEM CÁLCICA	90–98	0,1–0,8	0,5–3,5	0,2–1,0	0,5–5,0	0,2–3,8	0,1–0,6	96,0–98,5	–
CAL HIDRATADA CÁLCICA	70–74	0,1–1,4	0,5–2,5	0,2–0,8	23–27	1,5–3,5	0,1–0,0		0,5–1,8
CAL HIDRATADA DOLOMÍTICA OU MAGNESIANA	39–61	15–30	0,5–18,2	0,2–1,5	19–27	3,0–6,0	0,02–0,2	76–99	5 – 25
CAL VIRGEM DOLOMÍTICA OU MAGNESIANA	51–61	30–37	0,5–4,5	0,2–1,0	0,5–4,8	0,5–4,5	0,05–0,1		–

De acordo com Guimarães (2002) as cales na forma hidratada utilizada na estabilização ou melhoria dos solos no Brasil deve obedecer, no mínimo, às exigências da norma NBR-7175 (Cal hidratada para argamassas). A Tabela 2.4 mostra algumas das exigências contidas nessa norma.

Tabela 2.3 - Exigências químicas e físicas para comercialização das cales hidratadas (NBR 7175/2003)

<b>Exigências químicas</b>				
Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO+MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO <sub>t</sub> +MgO <sub>t</sub> )		≥ 88%	≥ 88%	≥ 88%
<b>Exigências físicas</b>				
Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura reti da acumulada)	Peneira 0,600mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≤ 75%	≤ 75%	≤ 70%
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

### 2.3.2 Reações solo-cal

Castro (1995) observa que quando se adiciona cal a um solo fino em presença de água, ocorrem simultaneamente algumas reações químicas. A estabilização química com cal é caracterizada por duas etapas distintas: uma etapa inicial rápida (que dura de horas a dias), e outra mais lenta, que pode levar meses a anos.

Clare & Cruchley (1957) (*apud* Núñez, 1991) afirmaram que quatro efeitos contribuem para o ganho de resistência de misturas solo-cal: a) formação de hidróxido de cálcio cristalino, com efeito cimentante; b) floculação e troca de íons; c) formação de carbonato de cálcio, com efeito cimentante; e d) formação de silicatos e/ou aluminatos hidratados de cálcio, também com efeito cimentante. Os mesmos autores concluíram que os efeitos imediatos da adição de cal a um solo se devem à floculação e à troca de íons, e que os efeitos durante a cura se devem à ligação das partículas do solo por silicatos e/ou aluminatos hidratados de cálcio.

Alguns fenômenos que podem originar a etapa rápida no processo da interação da cal com um solo fino são: troca catiônica, floculação-aglomeração e reações químicas. A fase lenta é caracterizada pelas reações pozolânicas, que proporcionam um aumento da resistência, devido à formação de produtos cimentantes; e pela carbonatação, que é uma reação prejudicial.

#### 2.3.2.1 Troca catiônica

Segundo Eades, Nichols & Grim (1962), Diamond & Kinter (1965), ambos citados por Guimarães (1971), Queiroz (1988) e Nóbrega (1988), a troca catiônica reflete uma ação imediata, que promove após alguns instantes de contato da cal com o solo, mudanças nas propriedades físicas da mistura. A literatura geralmente considera que são alterados:

- a granulometria, pela floculação das partículas originais. Isto se traduz por deslocamento da curva para o lado grosseiro;
- os limites de Atterberg, cuja alteração mais notável se relaciona ao limite de plasticidade, que normalmente aumenta;
- na compactação, quando se considera uma mesma energia, ocorre diminuição do valor da densidade máxima seca e aumento do valor da umidade ótima;

- a expansão e contração, que sofrem uma redução de valores, ou seja, uma menor variação volumétrica;
- acréscimo na capacidade de suporte.

De acordo com Nóbrega (1985), em presença de água, a cal adicionada provoca a saturação dos minerais argilosos do solo pelos cátions  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Mg}^{++}$ . Isto modifica, instantaneamente, todas as propriedades dependentes da carga e do estado da superfície das partículas (limites de consistência). Os cátions trocáveis determinam, de certa forma, as ligações entre as partículas de argila e o seu modo de associação, mudando o seu comportamento hídrico-mecânico.

Prusinski & Bhattacharja (1999) afirmam que a troca catiônica inicia o processo de estabilização muito rapidamente e é seguida pela floculação e aglomeração. Segundo os autores, a superfície do argilo-mineral é deficiente em carga e, para neutralizar essa deficiência, cátions e moléculas de água são atraídos para a superfície de clivagem carregada negativamente. Isso resultará em uma separação de duas camadas, chamada de dupla camada difusa. O mecanismo de troca de cátions é mostrado na Figura 2.3.

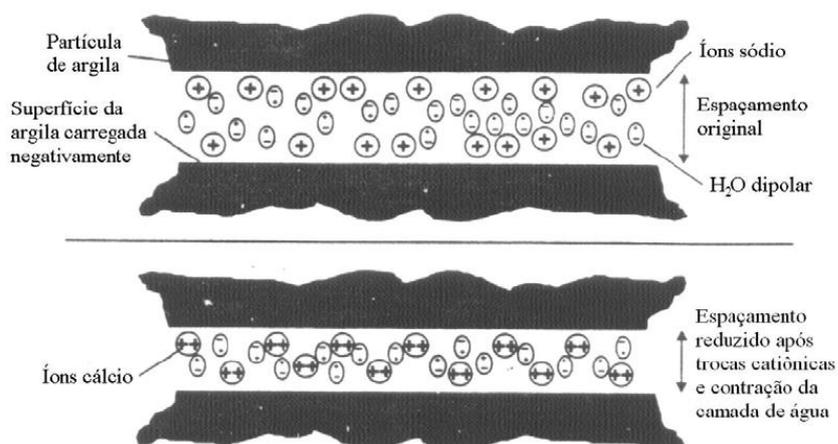


Figura 2.3 – Mecanismo de troca de cátions (Fonte: Prusinski & Bhattacharja, 1999)

De acordo com Guimarães (2002), quando a cal é adicionada ao solo o fenômeno de troca de bases ocorre com os argilo-minerais. Essa reação leva à floculação das partículas argilosas, causando o aumento no ângulo de atrito da massa do solo. Isto se manifesta no decréscimo do limite de liquidez (LL) e no índice de plasticidade (IP) e, frequentemente, no aumento da

umidade ótima. Ainda segundo os autores, a redução do LL e do IP, com adição de cal ou cimento, é provocada pela diminuição da espessura das camadas de água adsorvidas devido à troca de bases.

### 2.3.2.2 Floculação - aglomeração

A troca de cátions devido à adição da cal resulta na estabilização da camada de água intersticial e em uma redução considerável no tamanho desta (Little, 1995). O autor comenta que quando as partículas de argila aproximam-se mais umas das outras, devido a redução da camada de água dos poros, ocorre a floculação e a atração borda à face (Figura 2.4). Esse fenômeno (floculação) é causado pela concentração eletrolítica da água intersticial, pelo alto pH e pela redução na espessura de água, através de trocas catiônicas (Little, 1995).

Na Figura 2.4, pode-se observar que em “A” ilustra-se a perda de resistência do solo argiloso, onde as partículas estão separadas por uma larga camada de água. Em “B”, devido à adição da cal (cálcio) a camada de água é reduzida e ocorre a atração face à borda (aglomeração) das partículas e sua floculação.

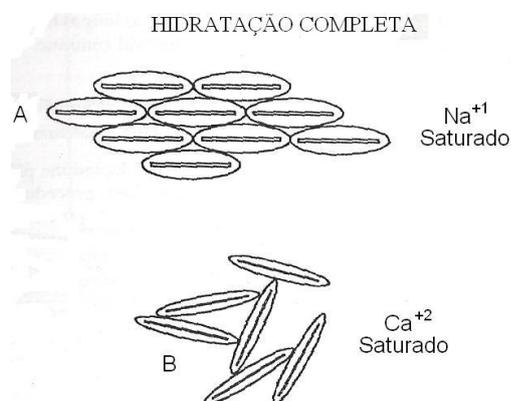


Figura 2.4 – Mudança textural ocorrida devido ao fenômeno da troca de cátions seguido pela floculação e aglomeração (Little, 1995).

A floculação e aglomeração causam mudanças na textura da argila, pois sua estrutura é alterada de plana e paralela para uma orientação aleatória de partículas (Prusinski & Bhattacharja, 1999). Conforme relato do TRB (1987), Herzog & Mitchell (1963) afirmaram que o fenômeno da floculação é causado pelo aumento da concentração eletrolítica da água

intersticial, pelo alto pH e pela redução da espessura da dupla camada difusa, através de trocas catiônicas.

### 2.3.2.3 Reações pozolânicas

Quando considerado o ganho de resistência a longo prazo, que é um fenômeno bem mais complexo e bastante influenciado pelas condições e mineralogia do solo, percebe-se que a reação responsável pelo desenvolvimento de uma matriz cimentante ao redor das partículas de solo e pelo processo de estabilização do mesmo, que ocorrem devido as reações entre a cal, a água, a sílica e a alumina, é denominada de pozolânica (Little, 1995).

As reações pozolânicas são responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica de misturas solo-cal. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água, formando diversos produtos cimentantes. Nos solos lateríticos estas fontes são o argilo-mineral (normalmente a caulinita), os componentes amorfos e a presença de ferro de diferentes formas (Campello *et al.*, 2000).

Segundo Rogers & Glendinning (2000), os íons hidroxila liberados da cal elevam o pH da mistura a um valor suficientemente alto, de modo que a sílica e a alumina sejam dissolvidas pela argila. Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio. Segundo relato do TRB (1987) esta reação não cessará enquanto houver  $\text{Ca}(\text{HO})_2$  reagindo e sílica disponível no solo. Conforme Ingles & Metcalf (1972), os géis de silicato resultantes da reação imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios. Os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos. Os autores salientam que esta reação só ocorre em presença de água, que tem a função de carregar os íons de cálcio e hidroxila para a superfície da argila. Este mecanismo é mostrado na Figura 2.5.

Guimarães (2002) comenta que a reação pozolânica está fundamentada no caráter pozolânico dos materiais estabilizados. O autor relata ainda uma definição, apresentada por Nóbrega (1981), sobre um material de característica pozolânica, afirmando que este quando em combinação com a cal e em presença de água, sob condições de temperatura ambiente, produz compostos hidratados estáveis com propriedades ligantes.

De acordo com Eades & Grim (1962) citados por Guimarães (2002), a reação pozolânica é lenta e só se completa alguns anos depois, requer temperatura acima de 21°C e o mínimo de

algumas semanas para sua ocorrência. Além da temperatura, do grau de cristalinidade dos minerais e do teor de água existente no sistema, o tipo de argila, as condições climáticas e a compactação imediata aparecem como fatores que influenciam no quimismo cal/solo.

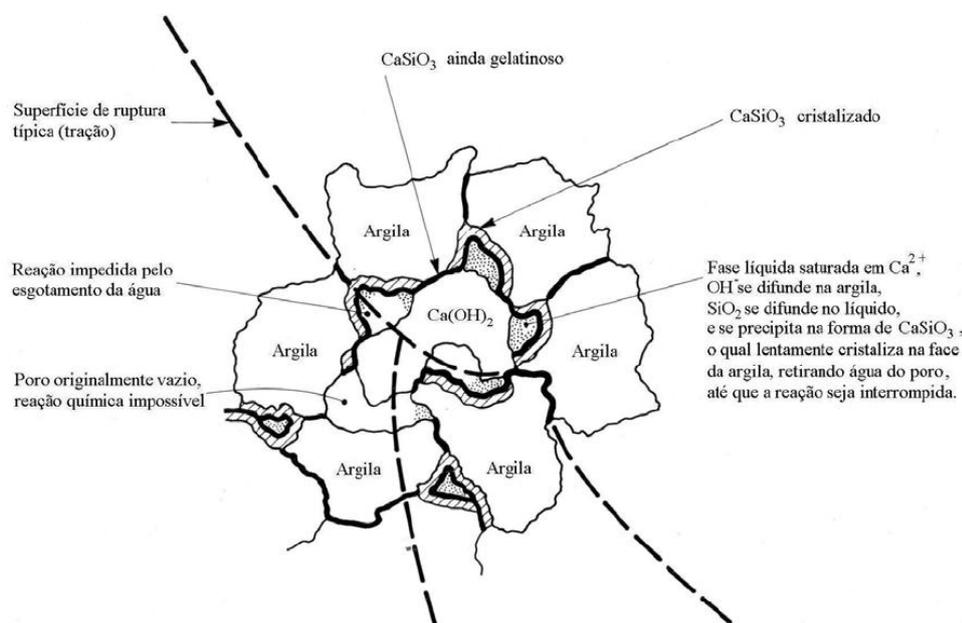
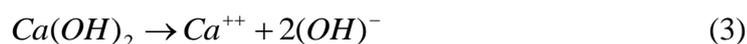


Figura 2.5 – Mecanismo de estabilização solo-cal (Fonte: Ingles e Metcalf, 1972)

Em outras palavras, a reação pozolânica ocorre quando a cal reage com a sílica e/ou a alumina amorfa do solo para formarem gel de silicato hidratado de cálcio ou aluminato hidratado de cálcio (CARVALHO, 1988). De acordo com Carvalho (1990), as reações pozolânicas para solos lateríticos e cal hidratada podem ser representadas, de forma resumida, pelas expressões de 3 a 6.



onde: C = CaO; S = SiO<sub>2</sub>; A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; H = H<sub>2</sub>O

CSH: silicato hidratado de cálcio

CAH: aluminato hidratado de cálcio

CSAHF: silico-aluminato ferroso hidratado de cálcio

Os solos, conforme relatos de Guimarães (2002), apesar de não se constituírem em pozolanas propriamente ditas, podem apresentar uma fração argila com caráter pozolânico mais ou menos acentuado, dependendo de sua natureza mineralógica e textural. De acordo com o autor, quando a cal é adicionada ao solo, seu pH, em geral 4,5 à 6,5, eleva-se para 11-12, criando-se condições alcalinas nas quais os minerais da fração argila, e até o próprio quartzo, podem reagir com a cal. Assim são formados aluminatos, silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, em números bastante significativos, todos com influência no processo de estabilização pelas suas características cimentantes.

No caso de solos lateríticos, a presença de óxidos e hidróxidos de ferro torna a análise do processo um pouco mais complexa. Para Queiroz de Carvalho (1988), a participação do ferro na reação solo laterítico-cal é de difícil avaliação, pois há evidências na literatura de que o ferro pode ou não ser um fator positivo nas reações. Sua forma de ocorrência nos solos lateríticos é o que determina sua influência nas reações: se o ferro ocorrer como partículas discretas, não interfere nas reações; se sua ocorrência for como partículas encobrindo as superfícies do argilo-mineral ou como agente cimentante, sua influência poderá ser negativa para a reação solo-cal. Segundo Townsend *et al.* (1971), a influência negativa se deve ao fato de que a presença de sesquióxidos nas superfícies do argilo-mineral inibe as reações entre o cálcio e a sílica.

Castro (1995) afirmou que é possível que óxi-hidróxidos de ferro e matéria orgânica bloqueiem parcial ou totalmente a superfície dos cristais dos argilo-minerais, ocasionando perda de reatividade à cal. Segundo o autor, as ligações entre a superfície dos argilo-minerais e o ferro livre são eficazes, dando origem inicialmente ao micro agregado que com o tempo se transformam em micro nódulos de cristais caulíníticos cimentados e resistentes à desagregação mecânica e à ação da água. De acordo com Nóbrega (1991) (*apud* Castro, 1995), o ferro é capaz de bloquear ou imobilizar parte da caulinita no interior dos micronódulos, fazendo com que estes solos não revelem sua textura argilosa (apesar do elevado teor de argila), e reajam com dificuldade quando tratados com cal. Entretanto,

segundo o autor, esta parcela ativa pode ser pequena, de modo que o restante, ainda associado à caulinita, não a impede de reagir.

Castro (1995) apresentou algumas conclusões do estudo de Nóbrega (1991), que estudou a micro estrutura de alguns solos brasileiros, entre eles os Latossolos Roxo e Vermelho Escuro. Segundo o autor, o Latossolo Roxo apresenta abundância de micronódulos resistentes à compactação, que são formados por partículas de caulinita cimentadas por hidróxido de ferros. As partículas são dificilmente penetradas pela cal, sendo atacadas apenas exteriormente. O Latossolo Vermelho Escuro é formado por micro agregados sem serem micro nodulados, que são destruídos em grande extensão na compactação, formando uma estrutura contínua, com núcleos de micro agregados parcialmente preservados, mas ligados por um plasma caulínico-ferrífero, extensamente atacado pela cal.

Alcântara *et al.* (1995) desenvolveram um trabalho que estudou a estabilização de três tipos de solo com cal. Para o teor de 10% de cal cálcica, constatou-se que o solo com maior porcentagem de argila (teoricamente mais reativo à cal), maior teor de  $Fe_2O_3$  e de matéria orgânica, apresentou pior desempenho. Esse comportamento evidencia a necessidade de considerar a influência das constituições química e mineralógica no comportamento mecânico de misturas solo-cal.

Segundo Queiroz de Carvalho (1983), a sílica e em parte a alumina acentuam o percentual da fração argila e aumentam a atividade coloidal. O autor observou também que os solos não plásticos possuem os menores teores de  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  amorfos, enquanto que solos com plasticidade mais alta possuem maiores teores de componentes amorfos. Esta relação foi justificada pelo fato de que os constituintes amorfos podem reter maior quantidade de água, resultando em um aumento da plasticidade. Para Townsend (1985) o sucesso da estabilização com cal depende principalmente da disponibilidade de sílica para as reações pozolânicas.

A presença de matéria orgânica também influencia o processo de estabilização, retardando as reações, e produzindo pequenos ganhos de resistência. De acordo com Thompson (1964) (*apud* Queiroz de Carvalho, 1979), afirmou que um solo com teor de matéria orgânica maior que 1% não responderia à estabilização. Em seu estudo, Queiroz de Carvalho (1979) constatou que os menores ganhos de resistência ocorreram em solos com maior teor de matéria orgânica.

Segundo Bhattacharja *et al.*(2003), a temperatura de cura também influencia as reações pozolânicas e, conseqüentemente, a velocidade do ganho de resistência. Uma maior temperatura de cura acelera as reações e a taxa de ganho de resistência, mas não garante um aumento na resistência máxima, podendo até reduzir seu valor. Esta possível queda na resistência pode ser devido à alteração dos produtos de reação e sua forma. Conforme os autores, a solubilidade do  $\text{Ca(OH)}_2$  diminui com o aumento da temperatura, reduzindo o suprimento de cálcio.

#### 2.3.2.4 Carbonatação

Outra reação que pode ocorrer durante a estabilização de um solo com a adição da cal é a carbonatação. De acordo com Guimarães (2002), esta reação apresenta origem diferente das anteriores. Contudo, também tem características de ação imediata e é de alta importância para a ocorrência ou não dos objetivos da estabilização.

Segundo Guimarães (1971), a carbonatação é a combinação do óxido ou hidróxido de cálcio ou magnésio com o anidrido carbônico presente nas minúsculas bolhas de ar, absorvidas ou retiradas no momento da mistura ou pela penetração do ar nos poros após a execução. A reação tende a refazer o carbonato de cálcio, na forma de um novo corpo sólido que se entrelaça com os demais constituintes do solo. A reação tende a refazer o carbonato original, visto que a decomposição pelo calor é uma reação reversível. Tem-se então:



ou



De acordo com Queiroz de Carvalho (1988) a reação de carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono da atmosfera reage com a cal para formar carbonatos de cálcio ou de magnésio, dependendo do tipo da cal utilizada (calcítica ou dolomítica). O autor afirma que este carbonato é um composto cimentante muito fraco e deletérico para o resultado final em termos de resistência.

Santos (2004) comenta que a reação de carbonatação, que ocorre entre o gás carbônico do ar e as minúsculas bolhas gasosas absorvidas pela mistura (refazendo o carbonato primitivo ( $\text{CaCO}_3$ )) é indesejável e que esta resulta em uma expansão do volume do solo.

Porém, Queiroz de Carvalho (1988) frisa que nem sempre todas as reações descritas anteriormente ocorrem. E cita o exemplo em que o cátion trocável do solo é o cálcio, situação esta que inibirá ou reduzirá a ocorrência da reação de troca de cátions. Esse fato pode ocorrer devido o cátion presente na cal também ser o cálcio.

O mesmo autor ainda cita o caso da reação de carbonatação, que pode ser impedida á medida que alguns cuidados são tomados, como a impermeabilização da superfície de contato da mistura com o ar.

Le Roux (1969) (*apud* Chauvel e Nóbrega, 1980) observou que a compactação imediatamente após a execução da mistura solo-cal é indispensável para evitar a carbonatação. A carbonatação da cal resulta numa perda de reatividade, pois a cal na forma de carbonato torna-se inerte, limitando o processo de estabilização. Portanto, neste caso a compactação tem o objetivo de reduzir a porosidade do material, principalmente os macroporos (caminho preferencial do ar), diminuindo a circulação interna de ar.

### **2.3.3 Variáveis do comportamento solo-cal**

De acordo com Santos (2004), o processo de estabilização solo-cal é influenciado, diretamente, pelo tempo de cura ao qual a mistura é submetida, pela temperatura em que esta sofre durante a cura, pela natureza do solo a ser tratado e pela natureza da cal utilizada. Além da temperatura, conforme Guimarães (2002), outros fatores ambientais interferem nos resultados obtidos nas reações entre o solo e a cal, como por exemplo: o anidrido carbônico presente no ar, a presença de águas superficiais e/ou subterrâneas no local, os índices pluviométricos da região e os esforços mecânicos produzidos na obra.

Segundo Guimarães (2002), a técnica solo-cal baseia-se na inter-reação entre os elementos constituintes do solo, a cal e os componentes presentes no meio-ambiente, de maneira que a interdependência entre eles é traduzida através das reações químicas, físicas e físico-químicas que ocorrem durante todo o processo de estabilização do solo. A Figura 2.6 apresenta o esquema dessa interdependência.

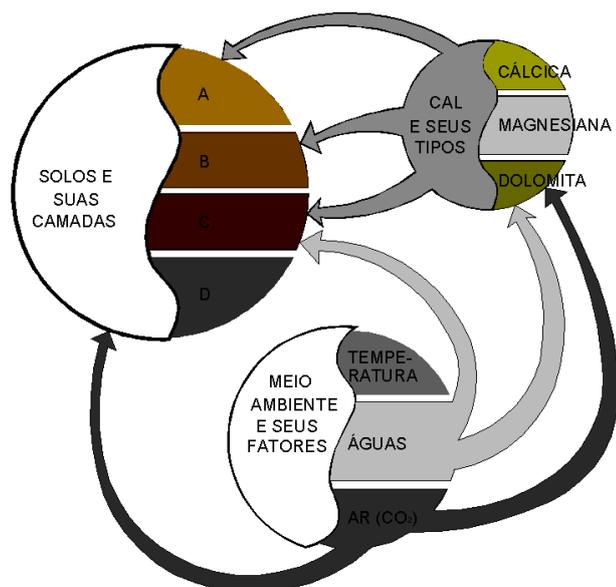


Figura 2.6 – Esquema de fatores que influenciam as reações solo-cal (GUIMARÃES, 2002).

Segundo Attoh-Okine (1995), algumas das principais propriedades e características dos solos que influenciam as reações solo-cal são: pH do solo, teor de matéria orgânica, drenagem natural, presença excessiva de sódio permutável, mineralogia da fração argila, grau de intemperismo, presença de carbonatos e/ou sulfatos, ferro extraível, relação sílica/alumina e relação sílica/sesquióxidos.

#### 2.3.3.1 Efeito da Cal

A primeira resposta da mistura solo-cal será a redução do índice de plasticidade e melhoria na trabalhabilidade e a segunda será no ganho de resistência através da cimentação das partículas (INGLES E METCALF, 1972; ATTOH-OKINE, 1995; TRB, 1987).

Guimarães (1971) afirma que, de modo geral, a cal afeta favoravelmente certas propriedades dos solos, o que se reflete em variações das características físicas seguintes: granulometria, plasticidade, contração e retração, umidade de campo, densidade, trabalhabilidade, desintegração e compactação, resistência e permeabilidade.

Guimarães (2002) comenta, ainda, que a cal, seja ela virgem ou hidratada, influi no processo de estabilização de um solo em função do valor de seus teores de óxidos de cálcio e de magnésio. Segundo Nóbrega (1981), os íons desses elementos, presentes nas cales, são

responsáveis pela modificação no comportamento dos argilo-minerais presentes no solo. Contudo, a autora afirma que cada solo reage de forma particular para cada tipo de cal aplicada e que a escolha e aplicação desta não pode ser aleatória.

Santos (2004) afirma que, de maneira geral, a resistência de um solo tratado com este estabilizante aumenta a medida que se adiciona uma porcentagem maior deste, havendo um crescimento além de determinado teor do aditivo. Este aumento está intimamente ligado ao tempo de cura ao qual a mistura foi submetida e a temperatura apresentada durante esse processo. A autora comenta que dos materiais envolvidos na mistura solo-cal, a natureza do solo é a que mais interessa, uma vez que a cal é facilmente selecionada e controlada.

Consoli *et al.* (2001), ao estudar um solo arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, verificaram que para uma mesma tensão confinante, o aumento da quantidade de cal provoca o aumento da resistência de pico e diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

#### 2.3.3.2 Efeito do Solo

Nóbrega (1985), afirma que a grande maioria das reações que se processam no sistema solo-água estão diretamente relacionadas à atividade das partículas existentes no material. Esta atividade é função da superfície específica dessas partículas, assim:

- a) as frações areias são inativas;
- b) a fração silte pode em alguns casos apresentar certa atividade;
- c) a fração argila é a mais ativa e a principal sede dos fenômenos físico-químicos que se processam no solo.

Para Mallela *et al.* (2004), o solo possui diversas propriedades e características que influenciam a sua reatividade com a cal. Dentre elas, podem ser citadas: o pH do solo, a mineralogia da fração argila, a presença de carbonatos e/ou sulfatos, a relação sílica/alumínio, a relação sílica/sesquióxidos, o grau de intemperismo, o teor de matéria orgânica, a drenagem natural, a presença excessiva de sódio permutável e o ferro extraível.

Para Guimarães (2002) cada solo possui as suas peculiaridades, e dependendo destas, a mistura com a cal será bem sucedida ou não. O autor apresenta uma classificação pedológica

das camadas de solos, conforme apresentada anteriormente na Figura 2.6, e classifica estas da seguinte maneira, em função de seus materiais constituintes:

- a) camada A: constituída por materiais orgânicos ou caracterizada por ser lavada;
- b) camada B: constituída por sais que emigram de outras camadas;
- c) camada C: constituída por rocha levemente alterada;
- d) camada D: constituída por rocha fresca.

Segundo o autor, as camadas representadas pela letra B e C, normalmente correspondentes aos materiais A6 e A7 da classificação do TRB, ou seja, aos solos argilosos, são as que intervêm no processo de estabilização. O autor comenta que nessas camadas localizam-se principalmente os óxidos e hidróxidos, particularmente os de ferro e de alumínio. Estes óxidos e hidróxidos interferem diretamente nas reações das misturas de solo-cal, dependendo do argilo-mineral do qual o solo é constituído.

#### 2.3.3.3 Efeito da Densidade e Compactação

De similar importância à quantidade de cal é a densidade na qual a mistura é compactada. Com o aumento da densidade, a resistência aumenta, a permeabilidade diminui até um valor mínimo, próximo da umidade ótima, depois começa a aumentar novamente (INGLES & METCALF, 1972).

Diversos autores observaram que misturas solo-cal apresentam menor massa específica aparente máxima ( $\gamma_d$ ) que o solo natural, para uma mesma energia de compactação. À medida que o teor de cal aumenta o  $\gamma_d$  continua diminuindo. Além disso, a umidade ótima aumenta com o aumento do teor de cal (TRB, 1987).

As partículas do solo, quando adicionada a cal, se tornam mais floculadas, devido à substituição dos íons sódio monovalentes da argila por íons de cálcio divalentes. Devido à floculação, a quantidade e o tamanho dos vazios no solo aumentam. Esta estrutura floculada é forte o suficiente para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo o  $\gamma_d$  do solo. Quanto mais vazios houver, mais água será necessária para preenchê-los, o que resultara em uma umidade ótima maior, e uma curva de compactação mais achatada (SIVAPULLAIAH *et al.*, 1998).

#### 2.3.3.4 Efeito do Teor de Umidade e da Relação Água/Cal

Solos estabilizados com cal normalmente são compactados em campo na umidade ótima para obtenção de uma massa específica aparente seca máxima, como determinado no ensaio de compactação de Proctor. Entretanto, estudos com solo-cal e solo-cimento mostram que em alguns casos, o teor de umidade proporciona máxima resistência e durabilidade não é necessariamente igual ao teor de umidade que gera a maior massa específica aparente seca, e sim um valor levemente inferior ao teor ótimo (CARRARO, 1997; FOPPA, 2005).

Kézdi (1979) observou que não existe uma correlação entre o teor de umidade de moldagem que confere aos corpos-de-prova o máximo valor de resistência e aquele que permite a compactação na máxima densidade.

Osinubi (1998) estudou a influência do retardamento na compactação em misturas solo-cal, observando uma redução na umidade ótima da mistura com a espera na compactação, o que pode ser atribuído às trocas catiônicas e à floculação das partículas de argila, que ocorrem simultaneamente, deste modo diminuindo a água disponível no sistema. Segundo o autor, em materiais compactados imediatamente após a mistura, a mudança nas características de compactação é principalmente devida à alteração na granulometria do solo; quando ocorre uma demora na compactação, os produtos de hidratação se unem às partículas tornando necessária a ruptura dessas agregações para que o solo seja compactado satisfatoriamente, o que pode não recuperar sua total resistência.

De acordo com Guimarães (1971), o tipo de cal utilizada também influencia no teor de umidade ótimo. Para um solo com 38% de argila e 32% de silte, estabilizado com cales cálcica e dolomítica, o autor observou uma umidade ótima em média 1,3% maior para as misturas com cal cálcica que para as misturas com cal dolomítica.

Na literatura foram encontrados somente trabalhos que utilizam a relação água/aglomerante para estimativa da resistência de solos tratados com cimento (FOPPA, 2005; AZAMBUJA, 2004). Em solos tratados com cal, Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a água somente é necessária para transportar os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila para que ocorram as reações químicas, e que o teor ótimo de água obtido pelo ensaio de compactação é suficiente para efetivar esse processo.

### 2.3.3.5 Efeito do Tempo de Cura

Ingles e Metcalf (1972) apresentam um estudo sobre a influência do tempo de cura em diferentes tipos de solos, tratados com 5% de cal hidratada, observando taxas de ganhos de resistência maiores em pedregulhos arenosos, conforme a Figura 2.7.

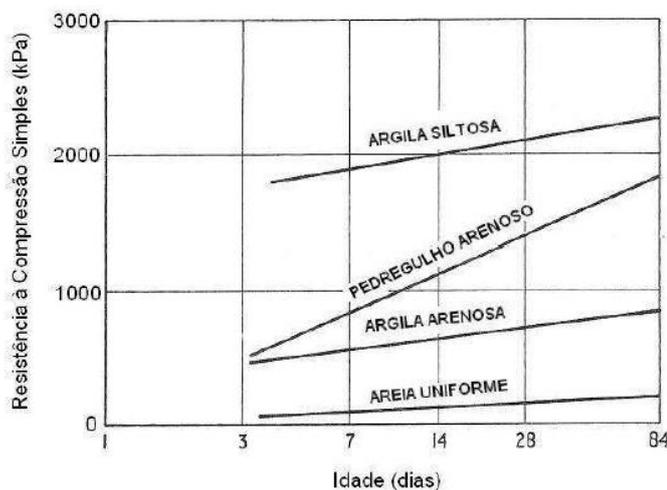


Figura 2.7 – Efeito do tempo de cura sobre a resistência à compressão simples para alguns solos estabilizados com cal (adaptado de INGLES E METCALF, 1972)

Thomé (1994) estudou misturas de uma argila mole (pedologicamente conhecida com Gley Húmico) com 5, 7 e 9% de cal dolomítica. Observou que a resistência não apresentou variação significativa para tempos de cura superiores a 7 dias. Segundo o autor, as reações pozolânicas foram impedidas ou sua quantidade insuficiente para cimentar as partículas. As reações pozolânicas poderiam ser impedidas pelos seguintes fatores simultâneos ou independentes: falta de água, temperatura de cura muito baixa, teor de cal insuficiente ou presença de matéria orgânica.

Carraro (1997) ao estudar um solo silte arenoso tratado com cinza volante e cal de carbureto, observou que o teor de cal presente nas misturas não exerceu influência significativa sobre os valores médios de resistência à compressão simples até a idade de 90 dias de cura, para a maior idade de cura adotada (180 dias), a resistência à compressão simples é fundamentalmente dependente do teor de cal de carbureto, apresentando uma relação aproximadamente linear.

### 2.3.3.6 Efeito da Relação Vazios/Cal

Não foram encontrados na literatura trabalhos que utilizam um fator correlacionando a quantidade de vazios com a quantidade de cal, para a estimativa da resistência de solo-cal. Nessa parte da revisão foram abordados os trabalhos que correlacionam a quantidade de vazios com a quantidade de cimento, para estimativa da resistência.

Segundo Larnach (1960), como a compactação em solos ou no solo-cimento nunca consegue expulsar completamente o ar do sistema solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar, a resistência não pode ser correlacionada com a relação água/cimento, pois esta só se aplica a materiais onde o ar foi totalmente expulso e os vazios existentes estão preenchidos por água, como no caso de argamassas de cimento e concretos tradicionais.

A relação vazios/cimento utilizada por Larnach (1960) é definida pela seguinte expressão:

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar + água)}}{\text{Volume absoluto de cimento}} \quad (9)$$

A Figura 2.8 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples das amostras de solo-cimento curadas previamente por 7 dias. Observa-se um bom ajuste dos dados à relação vazios/cimento.

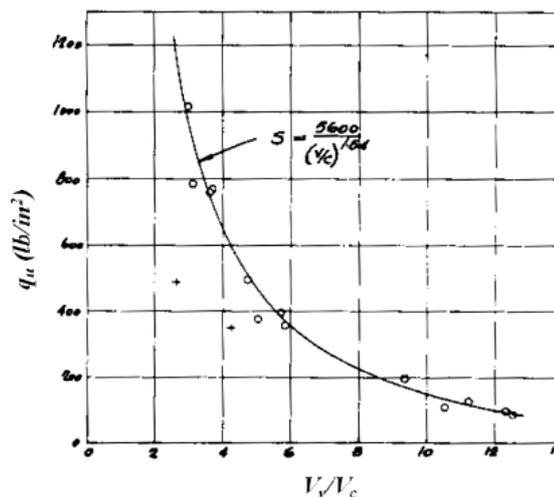


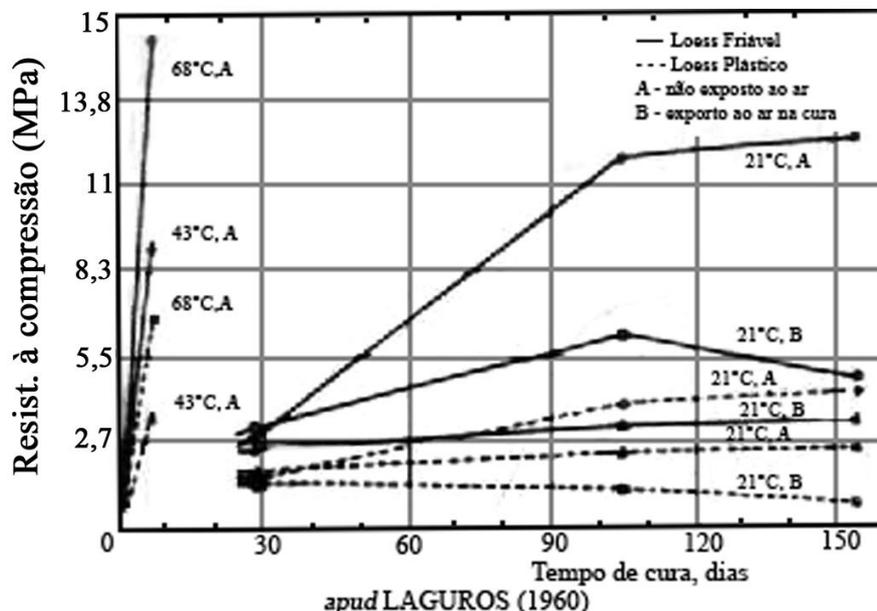
Figura 2.8 – Relação vazios/cimento pela resistência à compressão simples (adaptado de LARNACH, 1960)

Para Larnach (1960), o uso deste tipo de relação, similarmente ao que ocorre em concreto, pode ser de extrema utilidade para dosagem e controle de execução de misturas de solo-cimento em campo.

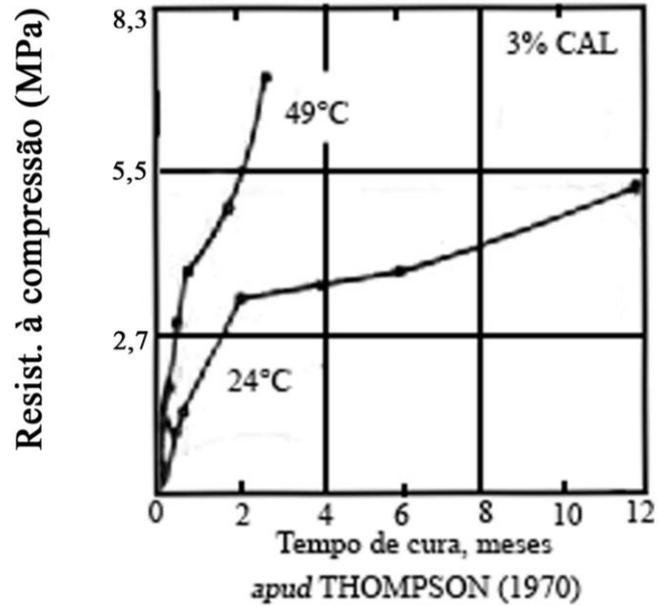
### 2.3.3.7 Efeito da Temperatura

Vários autores (GLENN, 1963; WANG, 1966; RUFF E HO, 1966) (*apud* NÓBREGA, 1985) observaram a ocorrência de minerais de neoformação diferentes, tanto em função do tempo como da temperatura, para misturas semelhantes. Essas variações são acompanhadas, em termos mecânicos, por aumento da capacidade de suporte. Para os autores este ganho de resistência é devido às diferentes fases do complexo de reação.

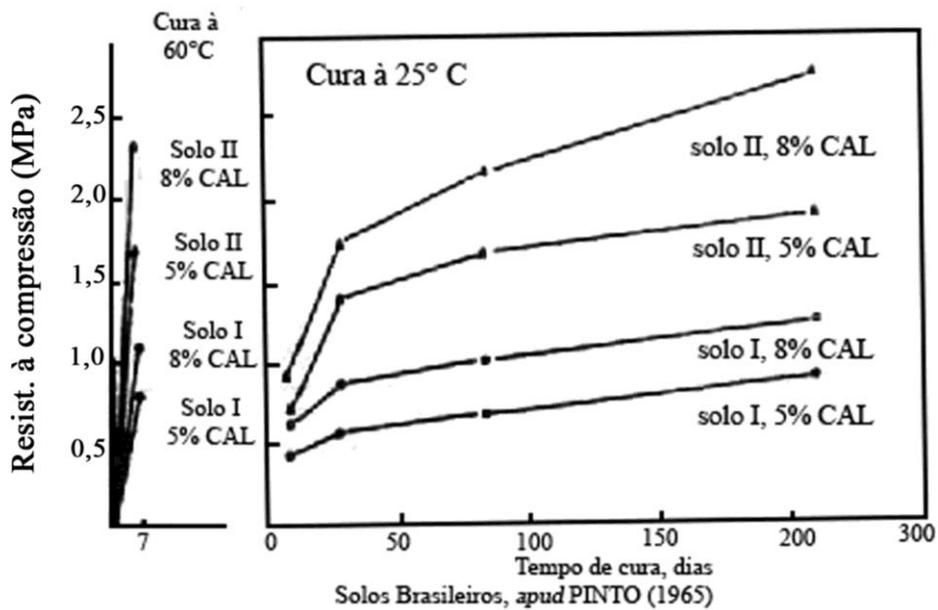
Pinto (1985), afirma que a cura em temperaturas elevadas provoca um ganho de resistência muito rápido, conforme foi verificado sistematicamente por vários pesquisadores, e se mostra na Figuras 2.9 (a, b e c). O autor afirma que com solos brasileiros foram registradas resistências de corpos-de-prova curados 7 dias a 60°C (de 8,3 a 23,0 kg/cm<sup>2</sup>, conforme o solo ou o teor de cal) intermediárias aos valores obtidos com cura de 100 a 200 dias, em temperatura de 25°C.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.9 – Influência da temperatura e do tempo de cura na resistência de misturas de solo e cal (PINTO, 1985).

Lockett e Moore (1982) (*apud* Pinto, 1985) recomendam uma cura de 72 horas a 41°C que reproduzem a resistência aos 14 dias em temperatura ambiente, a qual é cerca de 75% da resistência aos 28 dias. Isto com base em ensaios feitos com vários solos do sudoeste dos Estados Unidos.

O aumento da resistência à compressão simples de misturas solo-cal, com o aumento da energia de compactação, foi observado por Mateos (1964) (*apud* Lopes Junior, 2007), que afirmou que a resistência das misturas é fortemente influenciada pela temperatura de cura, recomendando a construção de camadas de pavimento estabilizadas com cal no início do verão.

### **2.3.4 Propriedades do solo estabilizado com cal**

Quando se adiciona cal a um solo argiloso suas propriedades físicas são alteradas, apresentando, em geral, melhora na plasticidade, trabalhabilidade, e nas características de resistência, tensão-deformação e fadiga. Essas alterações dependem de diversos fatores, entre eles: tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação, período e condições de cura (LOVATO, 2004).

Segundo Prusinski e Bhattacharja (1999), a dosagem do estabilizante determina até que teor de cal o solo terá suas propriedades modificadas. O teor de estabilizante necessário depende do objetivo específico do processo de estabilização: modificação ou estabilização.

#### **2.3.4.1 Características de compactação**

Diversos autores observaram que misturas solo-cal apresentam menor peso específico aparente máximo que o solo natural, para uma mesma energia de compactação. À medida que o teor de cal aumenta o  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  continua diminuindo. Além disso, a umidade ótima aumenta com o aumento do teor de cal (TRB, 1987).

As partículas do solo, quando adicionada cal, se tornam mais floculadas, devido à substituição dos íons sódio monovalentes da argila por íons cálcio divalentes. Devido à floculação, a quantidade de vazios e o tamanho dos vazios no solo aumentam. Esta estrutura floculada é forte o suficiente para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo assim o  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  do solo. Quanto mais vazios houver, mais água será necessária

para preenchê-los, o que resultará em uma umidade ótima maior, e uma curva de compactação mais achatada (SIVAPULLAIAH *et al.*, 1998).

Entretanto, Castro (1995) salienta o pequeno aumento no peso específico aparente seco máximo da mistura mesmo quando se aumenta a energia de compactação do Proctor Normal para 1 a 1,5 vezes a do Proctor Modificado. Segundo o autor, isso indica que não se deve dar atenção apenas ao valor do peso específico aparente seco da mistura, mas sim no seu processo de densificação, dispensando-se cuidado especial à escolha do tipo e energia de compactação, que devem ser os mais adequados possíveis ao objetivo pretendido, para que se inicie a ativação mecânico-química da geopolimerização (estabilização).

Osinubi (1998) estudou a influência do retardamento da compactação no peso específico aparente seco máximo de misturas solo-cal, constatando uma tendência de diminuição no  $\gamma_d$  à medida que o tempo de espera entre a mistura e a compactação aumenta. O autor observou também uma redução na umidade ótima da mistura com a espera na compactação, o que pode ser atribuído às trocas catiônicas e a floculação das partículas de argila, que ocorrem simultaneamente, deste modo diminuindo a água disponível no sistema. Segundo o autor, em materiais compactados imediatamente após a mistura, a mudança nas características de compactação é principalmente devida à alteração na granulometria do solo; quando ocorre uma demora na compactação, os produtos de hidratação se unem às partículas tornando necessária a ruptura dessas agregações para que o solo seja compactado satisfatoriamente, o que pode não recuperar sua total resistência.

Holt e Freer-Hewish (1998) também estudaram o efeito do tempo entre mistura e compactação em solos estabilizados com cal, para tempos de 0,5 a 3 dias. Segundo os autores, as amostras (levemente pré-compactadas, curadas com superfície exposta e remisturadas após este período) apresentaram geralmente peso específico aparente seco máximo menor e umidade ótima maior com o aumento do tempo entre mistura e compactação.

De acordo com Guimarães (1971), o tipo de cal utilizada também influencia no teor de umidade ótimo. Para um solo com 38% de argila e 32% de silte, estabilizado com cales cálcica e dolomítica, o autor observou uma umidade ótima em média 1,3% maior para as misturas com cal cálcica que para as misturas com cal dolomítica.

### 2.3.4.2 Resistência à Compressão Simples

A resistência de misturas solo-cal normalmente é avaliada através dos ensaios de compressão simples, compressão triaxial e Índice de Suporte Califórnia (ISC), e depende de diversas variáveis como: tipos de solo e cal, teor de cal, tempo e temperatura de cura (TRB, 1987).

Segundo Ingles e Metcalf (1972), geralmente, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certo nível, usualmente 8% para solos argilosos. A partir deste ponto a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, devido às misturas solo-cal apresentarem uma cimentação lenta e dependerá do tipo de solo (Figura 2.10).

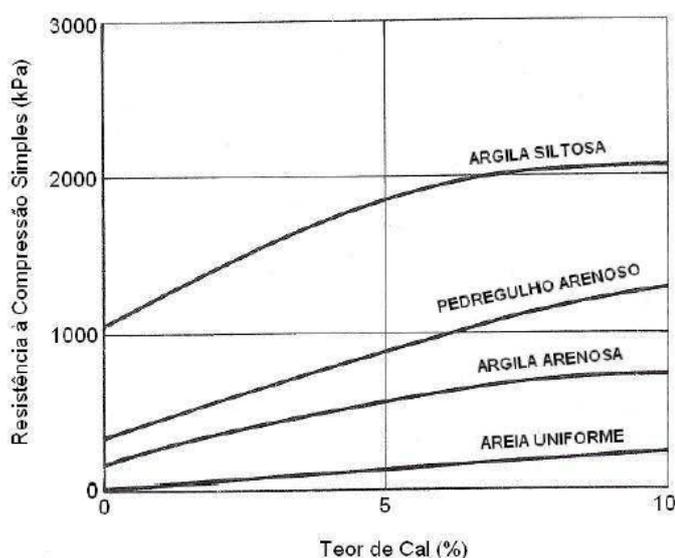


Figura 2.10 – efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para alguns solos tratados com cal e curados por 7 dias (adaptado de INGLES E METCALF, 1972)

Herrin e Mitchell (1961) afirmaram que não há, aparentemente, um teor ótimo de cal, que produza a máxima resistência em um solo estabilizado. Apontaram o teor e tipo de cal, o tipo de solo, a massa específica, o tempo e tipo de cura, como sendo os principais fatores que influenciam a resistência de misturas de solo e cal.

Ormsby e Kinter (1973), por sua vez, constataram que em solos ricos em caolinita a adição de cal cálcica dá maiores resistências do que a dolomítica, sendo a resistência à compressão

simples função linear do teor de cal adicionado. Já para solos contendo montmorilonita a relação é uma equação do segundo grau, e os melhores efeitos são obtidos com a adição de cal dolomítica.

### **2.3.5 Um comportamento inesperado ao estabilizar-se um latossolo com cal – a pesquisa realizada por Lovato (2004)**

Em 2004, Lovato apresentou um estudo laboratorial sobre o comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal cálcica e com cal dolomítica. Este tipo de mistura foi empregado em um pavimento experimental construído na rodovia BR-377/RS, próximo à cidade de Cruz Alta, no final dos anos 60.

Seu estudo incluiu a caracterização do solo (latossolo vermelho), além de ensaios de compactação, difratometria de raios-X, compressão simples, tração por compressão diametral, tração na flexão, módulo de resiliência e durabilidade, do solo e das misturas solo-cal.

O autor determinou as influências do teor e tipo de cal e do tempo de cura, nas resistências à compressão simples e à tração e no módulo de resiliência. Para tanto, foram adotados teores de 3%, 4% e 5% de cal, e tempos de cura de até 168 dias.

Seus resultados mostraram que o solo empregado era reativo à cal, sendo necessário 3% de cal para sua estabilização. A mistura de solo +4% de cal cálcica após 28 dias de cura, apresentou elevadas RCS (1.529kPa), à tração na compressão diametral (216kPa), bem como elevados módulos de resiliência (10.772MPa). Contudo, observou-se que após terem atingido valores máximos, a resistência e a rigidez das misturas solo-cal diminuíram com tempos de cura mais longos, possivelmente, nas palavras do autor, devido à formação de  $\text{CaCO}_3$  e/ou produtos expansivos (etringita e taumasita).

Lovato (2004) descreveu em suas conclusões que a evolução da RCS com o tempo de cura, das misturas com cal cálcica, foi dividida em três fases distintas: até os 56 dias, dos 56 aos 112 dias, e dos 112 aos 168 dias. Supôs-se, à época, que as reações pozolânicas cessaram aos 28 dias (3% de cal) e aos 56 dias (4 e 5% de cal), pela ausência de íons cálcio disponíveis. Entretanto, dos 56 aos 112 dias houve uma queda de resistência, e dos 112 aos 168 dias a resistência permaneceu praticamente constante. Essa queda foi atribuída a uma possível formação de etringita e taumasita, aliada à carbonatação da cal. A Figura 2.11 apresenta os resultados do autor:

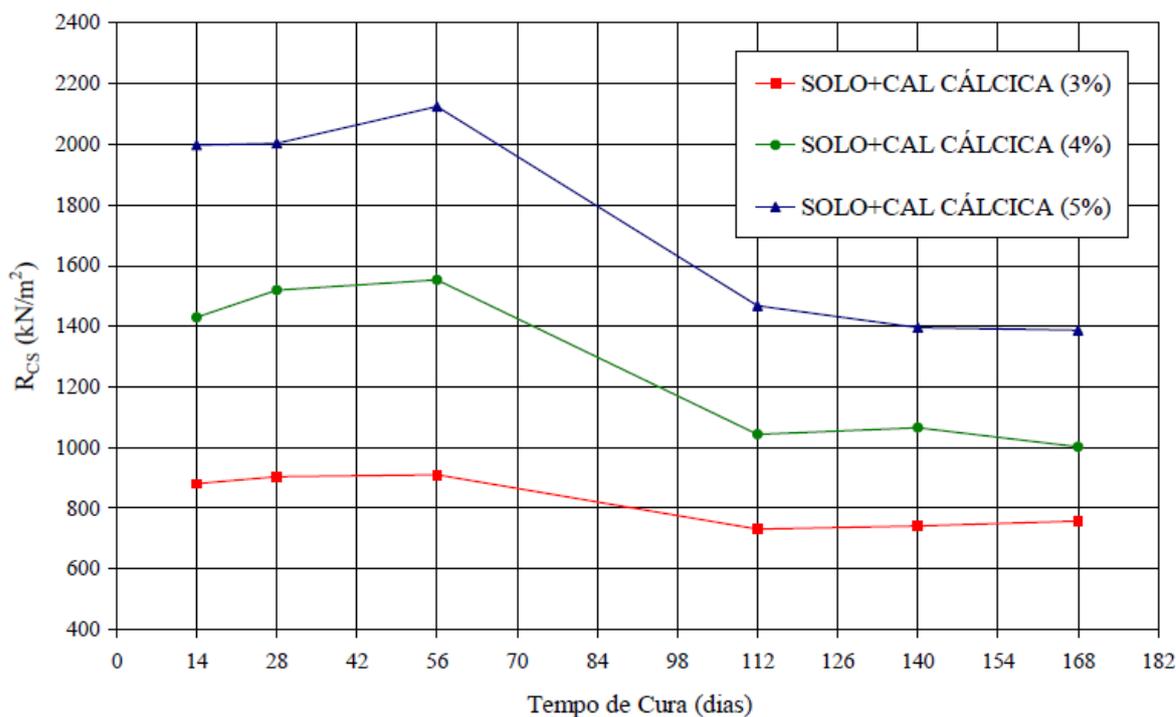


Figura 2.11 – Evolução da resistência à compressão simples com o tempo de cura (solo + cal cálcica) (Fonte: Lovato, 2004)

## 2.4 FERTILIZANTES

Fertilizantes ou adubos são compostos químicos que visam suprir as eficiências em substâncias vitais à sobrevivência dos vegetais. São aplicados na agricultura com o intuito de melhorar a produção. As plantas necessitam de diversos elementos químicos:

- Macronutrientes: carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo, enxofre, cálcio, magnésio e potássio.
- Micronutrientes: boro, cobalto, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco.

Alguns desses elementos estão fartamente disponíveis no meio ambiente de nosso planeta e são diretamente assimiláveis pelas plantas, como carbono, hidrogênio e oxigênio. Outros como nitrogênio, apesar de fartamente disponível na atmosfera, não são diretamente absorvíveis pelas plantas, ou o processo de absorção é muito lento face à demanda produtiva. Aos elementos necessários e que são normalmente adicionados pelos agricultores as suas

plantações para suprir essas deficiências e aumentar a produtividade, chamamos adubo ou fertilizantes.

### **2.4.1 Fertilizantes minerais**

São extraídos de minas e transformados em indústrias químicas. São diretamente assimilados pelas plantas ou sofrem apenas pequenas transformações no solo para serem absorvidos. Podem conter apenas um elemento ou mais de um. Os principais elementos fertilizantes são: nitrogênio, fósforo e potássio. Existem também os micronutrientes como bórax, sulfato de zinco dentre outros que podem ser agregados nos fertilizantes.

Os principais grupos de fertilizantes minerais são:

- a) fertilizantes nitrogenados;
- b) fertilizantes fosfatados;
- c) fertilizantes potássicos;
- d) fertilizantes mistos – contem mais de um elemento nutritivo predominante (nitrogênio, fósforo e potássio);
- e) fertilizantes calcários (ou corretivos).

Em geral, os fertilizantes minerais são sais inorgânicos de diferentes solubilidades. A eficiência agrônômica depende da sua solubilidade e das reações químicas com os solos. Os fertilizantes nitrogenados, por exemplo, são totalmente solúveis no solo, podendo ser lixiviados parcialmente.

Os fertilizantes minerais apresentam uma fórmula ou concentração, que expressa, em porcentagem, a quantidade de nutrientes contidos no fertilizante e é representada por três números em linha horizontal e separados por um traço. O primeiro corresponde à porcentagem de nitrogênio (N), o segundo à porcentagem de óxido fosfórico ( $P_2O_5$ ) e o terceiro à porcentagem de óxido de potássio ( $K_2O$ ), por exemplo, 10-10-10 (equivalente a 10% de nitrogênio, 10% de óxido fosfórico e 10% de óxido de potássio). Comumente utiliza-se apenas a definição de N-P-K como Nitrogênio-Fósforo-Potássio.

Os fertilizantes minerais podem ser na forma de pó ou farelo e granulados. Pó quando as partículas são de pequenas dimensões, e granulados quando as partículas são de dimensões que permitem caracterizar um grânulo. As misturas de granulados são obtidas pela simples mistura de dois ou mais fertilizantes simples granulados, caracterizam-se por apresentar os nutrientes diferentes nos grânulos; as misturas granuladas são obtidas pela mistura de dois ou mais fertilizantes simples em pó e sua posterior granulação, contendo todos os nutrientes referenciados na fórmula em cada grânulo.

A influência do tamanho das partículas nas características dos fertilizantes sólidos ocorre porque a subdivisão de um material aumenta sua superfície de exposição por unidade de massa. Características dos fertilizantes como dissolução, higroscopicidade e outras, são aumentadas ou reduzidas em função do tamanho das partículas componentes do fertilizante. Os fertilizantes solúveis em água e higroscópicos, como nitrato de amônio, uréia, nitrocálcio, são mais eficientes com granulometria grosseira, fertilizantes pouco solúveis em água, como os termofosfatos, fosfatos naturais, devem ser preferencialmente usados os de granulometria fina.

Um único produto pode apresentar um, dois ou mais macronutrientes primários, podendo conter, também, macronutrientes secundários e micronutrientes. Na maioria das condições de cultivo mais de um macronutriente primário é necessário, o que fez crescer o uso de fertilizantes com vários nutrientes, especialmente o nitrogênio, o fósforo e o potássio, obtido através da mistura de fertilizantes. Entretanto os fertilizantes que contêm apenas um ou dois nutrientes (fertilizantes simples) permitem o preparo de misturas específicas pelo consumidor e o parcelamento na aplicação de certos nutrientes.

#### **2.4.2 Fertilizantes orgânicos**

São resíduos animais ou vegetais, sendo de ação mais lenta que os minerais, visto que necessitam transformações maiores (serem desmontados em compostos inorgânicos) antes de serem utilizados pelos vegetais. Promove o desenvolvimento da flora microbiana e por conseqüência melhoram as condições físicas do solo; assim, a presença de matéria orgânica acelera a atuação dos fertilizantes químicos. Os grandes grupos de fertilizantes orgânicos são:

- a) esterco de curral – para melhor aproveitamento dos fertilizantes contidos nesse fertilizante, faz-se necessário que o fertilizante seja curtido, geralmente por

trinta dias sob condições especiais. O nitrogênio (N) não ultrapassa 1% da composição exceto no esterco de galinha, onde pode atingir 1,5% a 2%;

- b) resíduos de matadouros – são ossos, sangue seco ou farinha de sangue (extraído os ossos e gordura em tanques a pressão), chifres e cascos. Esses dois últimos de difícil assimilação;
- c) resíduos oleaginosos – são subprodutos da indústria de óleos;
- d) vinhaça – são subprodutos das usinas após a destilação do álcool. Apesar de ser solução ácida, produz efeito alcalinizante;
- e) resíduo de filtro prensa – é subproduto da usina de açúcar;
- f) adubo verde – São cultivos que se praticam para serem enterrados no solo. Geralmente leguminosas de enraizamento mais profundo. Num solo sem fertilidade pelo uso excessivo e muito afetado pela erosão, às vezes, só pega no segundo ano, assim é recomendado, nesses casos, sementes inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio. Alguns cultivos praticados: feijão de porco, feijão guandu, mucuna, feijão baiano e soja.

Os fertilizantes minerais em relação aos orgânicos apresentam uma vantagem do ponto de vista econômico, por apresentarem elevadas concentrações de nutrientes, resultando em menores custos de armazenamento, transporte e aplicação por unidade de massa de nutriente. Os produtos orgânicos desempenham muito mais as funções de condicionador do solo e muito pouco as funções de fertilizante, enquanto os produtos minerais desempenham efetivamente as funções de fertilizante.

## **2.5 EFEITOS DELETÉRIOS DE COMPOSTOS QUÍMICOS NO SOLO ESTABILIZADO**

Os compostos químicos mais conhecidos por alterarem a estabilização de solos com cal ou cimento são os sulfatos (MITCHELL, 1986; HUNTER, 1988; SHERWOOD, 1962) e a matéria orgânica (BISWAS, 1972; CRISTELO, 2001; SHERWOOD, 1995). No entanto, vários casos de falha de estabilização do solo têm sido relatados por pesquisadores em solos sem sulfatos ou matéria orgânica identificados. Nestes casos, outros compostos são

considerados para explicar essas falhas, como os contidos nos fertilizantes agrícolas (nitratos e fosfatos) ou cloretos nas proximidades das costas marítimas (LCPC-SETRA, 2000).

### 2.5.1 Efeito da matéria orgânica

Vários autores já demonstraram que quantidades significativas de matéria orgânica presente no solo são prejudiciais à sua estabilização com cal ou cimento.

A matéria orgânica apenas retarda o aumento da resistência da mistura solo-cal provocado pelas reações pozolânicas. Sendo assim, será lógico pensar que a matéria orgânica nem combina com a cal adicionada ao solo, impedindo o desenvolvimento das referidas reações, nem impede a dissolução da sílica e alumina nele presentes. Segundo Sherwood (1995), é o tipo de matéria orgânica presente que é importante, e não a sua quantidade. Isto porque a matéria orgânica não interfere necessariamente com os processos de hidratação e, portanto o conhecimento da sua quantidade não é só por si decisivo.

São normalmente considerados três mecanismos básicos envolvidos na reação da matéria orgânica com o solo estabilizado com cal:

- a) reação de troca entre os cátions orgânicos e os íons de cálcio da cal;
- b) reação química entre a matéria orgânica ativa e os íons de cálcio;
- c) efeito de “máscara” provocado pelos cátions orgânicos sobre as partículas de argila, impedindo a dissolução da sílica e alumina.

De acordo com Cristelo (2001), a matéria orgânica do solo possuiu uma elevada capacidade de troca de base. Quando a cal é adicionada ao solo, alguns íons  $\text{Ca}^{++}$  da cal são utilizados para satisfazer a capacidade de troca da matéria orgânica, reduzindo a quantidade de cal disponível para a reação pozolânica.

Thompson (1966) (*apud* Biswas, 1972) considera que apenas o terceiro mecanismo referido é válido. Isto porque se os outros dois processos são responsáveis pela perda de reatividade à cal, aumentos na percentagem de cal poderiam fornecer uma quantidade de íons cálcio suficiente para compensar os utilizados nas reações com os cátions orgânicos. Contudo, e ao contrário de Arman e Munfakh (1967) (*apud* Biswas, 1983), que concluíram que solos contendo quantidades significativas de matéria orgânica podiam ser estabilizados aumentando

a percentagem de cal, as investigações de Thompson com solos do estado do Illinois revelaram que um aumento da cal usada na estabilização não melhora a reatividade do solo.

O mecanismo envolvido na reação dos sulfatos com os solos estabilizados com cal foi estudado por Sherwood (1962) (*apud* Biswas, 1972). Os sulfatos presentes na mistura solo-cal podem levar à sua progressiva desintegração. Este efeito é facilitado quando o solo contém uma fração argilosa significativa e quando o seu teor em água puder ainda ser aumentado para valores superiores ao utilizado na sua compactação. Quando o pH da mistura é elevado ocorre uma reação entre a argila e os íons de sulfato na presença de  $\text{Ca(OH)}_2$  e da água em excesso. A reação pode resultar na formação de sulfo-aluminato de cálcio, que ocupa um volume consideravelmente superior ao dos constituintes a partir dos quais foi formado. A expansão deste mineral destrói as ligações existentes no solo estabilizado.

### **2.5.2 Efeito de sulfatos**

A presença de sulfatos nos solos argilosos induz expansões quando estes solos são tratados com cal, provocando rupturas de muitas estruturas e obras de pavimentação (MITCHELL, 1986; HUNTER, 1988). Hunter (1988) reportou este fenómeno, chamado de expansão induzida por sulfatos, em solos argilosos altamente ativos que contêm pelo menos 10% de argilas e onde existe água suficiente para possibilitar a expansão.

Basicamente quatro componentes são responsáveis pela degradação causada por sulfatos: cálcio, alumínio, água e sulfatos. Juntos e na combinação certa, estes componentes produzirão sulfo-aluminato hidratado de cálcio com um grande potencial expansivo, superior a 250% em alguns casos. Um destes minerais é chamado etringita. Este mineral pode manter grandes quantidades de água em sua estrutura. Durante a formação da etringita, altos níveis de pressão podem se desenvolver e um grande aumento de volume pode ocorrer (NLA, 2001).

De acordo com Rollings & Rollings (2003), durante a estabilização com cal, o pH é aumentado para cerca de 12. Acima de 9 a solubilidade da sílica e alumina aumentam exponencialmente, e isso libera alumina quimicamente ativa dos argilo-minerais do solo. Esta alumina agora está livre para participar das reações pozolânicas de estabilização e também a formação de etringita, destrutiva se a contaminação de sulfato for presente. Os mesmos autores também afirmam que a quantidade de argilo-minerais disponíveis para libertar a alumina e a proporção relativa de alumina do argilo-mineral são considerados como fatores importantes para a gravidade do ataque de sulfato de materiais de cal estabilizada.

Segundo Hunter (1988) e Petry e Little (1992), os sulfatos, quando presentes em suficiente quantidade no solo, interferem nas reações pozolânicas entre os íons  $\text{Ca}^{++}$  liberados da cal e a sílica e a alumina dissolvidas dos argilo-minerais, formando etringita. A etringita pode se transformar em taumasita se houver fontes adequadas de carbonato e sílica (PETRY & LITTLE, 1992) e em condições de temperatura abaixo de  $15^{\circ}\text{C}$  (HUNTER, 1988). A formação de etringita causa uma brusca queda do pH da mistura solo-cal, sendo mais uma causa da inibição das reações pozolânicas solo-cal (PETRY & LITTLE, 1992).

A expansão induzida por sulfatos afeta as reações pozolânicas dependentes do tempo, não interferindo nas reações rápidas (HUNTER, 1988). Os níveis do chamado sulfato solúvel discutidos como potencialmente problemáticos diferem em cada publicação. Hunter (1988) reporta como nível máximo 10%. Mitchell & Dermatas (1990) identificaram etringita formada em presença de concentrações muito pequenas de sulfato de 0,3%. Para a NLA (2001), se o nível total de sulfatos solúveis é inferior a 0,3%, ou 3.000 partes por milhão (ppm), em peso de solo, a estabilização com cal não terá problemas significativos. A mesma entidade considera valores entre 0,3% e 0,5% como de risco moderado ao ataque de sulfatos, 0,5% e 0,8% como alto risco e acima de 0,8% como risco inaceitável.

A formação de etringita e minerais similares pode ser evitada através da interrupção do fornecimento de qualquer um dos quatro componentes: cálcio, alumínio, água e sulfato. Quando cal e água são adicionados à argila, o cálcio é fornecido pela cal e o alumínio é liberado da argila no sistema de alto pH produzidas por cal e água. Se o solo contém uma elevada concentração de sulfato na forma de gesso, por exemplo, todos os ingredientes, com exceção da água, agirão na formação de minerais expansivos (NLA, 2001).

Os problemas resultantes das reações de sulfatos nos solos estabilizados de pavimentos geralmente são exibidos através de rachaduras devido aos minerais expansivos produzidos, como a etringita ( $\text{C}_3\text{A}.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$ ) e taumasita ( $\text{CaSiO}_3.\text{CaSO}_4.\text{CaCO}_3.15\text{H}_2\text{O}$ ). A reação é denominada expansiva quando o volume de produto formado é mais do que o volume combinado dos ingredientes. As fontes de íons sulfato são o solo ou águas subterrâneas, ou ambos. A sílica e a alumina da argila tornam-se solubilizadas em pH elevado no decurso do processo de estabilização, e os íons de cálcio são fornecidos pelo agente estabilizante utilizado. Na presença de água, estes íons, podem reagir para formar etringita. A quantidade de etringita formada depende, portanto, depende da disponibilidade destes íons (TAYLOR, (1990) *apud* BHATTACHARJA *et al.*, 2003).

Não há resposta fácil para o problema. O cálcio está presente quando a cal ou cimento portland são usadas para a estabilização do solo. Solos com argila são ricos em alumínio, uma unidade estrutural básica de argila. A água é necessária para a compactação e para as reações de estabilização e está presente dentro das estruturas do pavimento durante a sua vida útil. Infelizmente, os sulfatos geralmente não podem ser eficientes ou economicamente retirados do solo (NLA, 2001).

Cuisinier *et al.* Obtiveram resultados que mostraram que a presença de sulfatos pode levar a mudanças dramáticas de volume no solo estabilizado e portanto, a uma diminuição do seu desempenho mecânico. Estes resultados são semelhantes aos estudos que podem ser encontrados nos estudos de Sherwood (1962). Além disso, os resultados mostraram que a presença de sulfatos não é sistematicamente associada a uma alteração do processo de estabilização do solo, segundo os autores, o impacto de sulfatos na estabilização do solo está diretamente relacionada às condições de cura, temperatura e teor de água. Conclusões semelhantes foram divulgadas por Wang *et al.* (2003) e Harris *et al.* (2004), no caso da estabilização de solos com teores de sulfato.

### **2.5.3 Efeito de nitratos**

Durante este estudo, não foram encontradas referências sobre a influência de nitratos na estabilização do solo com cal ou cimento. No entanto, uma avaliação dos seus potenciais efeitos negativos sobre a estabilização do solo pode ser inferida a partir da química do cimento. Na verdade, os nitratos são conhecidos por alterar as estruturas de concreto (MOHAN & RAI, 1978; UKRAINCIIK ET AL., 1978). Esta alteração é o resultado do ataque sobre os compostos de cimento através de uma reação ácido-básico envolvendo principalmente nitrato de amônia. Os sais de cloreto de amônia, nitrato de amônia e sulfato de amônia desintegram lentamente o concreto e atacam violentamente o aço diminuindo o desempenho mecânico do concreto.

Além disso, Justness & Nygaard (1995) e Hill & Daugherty (1996) concluíram que a influência de nitratos na hidratação do cimento é bastante modesta: ligeira aceleração das reações foi detectada para concentrações inferiores a 1 e 2 mol L<sup>-1</sup>, dependendo dos contra-íons, e um leve retardo para concentrações mais elevadas. Argamassas preparadas com soluções de KNO<sub>3</sub> e NaNO<sub>3</sub> apresentou expansão, que aumentou com a concentração de nitrato na solução de mistura. A partir desta revisão da literatura, deve salientar-se que tais

reações deletérias podem ocorrer em solos estabilizados com cal ou cimento se a concentração de compostos de nitrato for suficientemente elevada.

Cuisinier *et al.* (2010) demonstraram que a presença de nitratos em concentrações representativas do que pode ser encontrado em solos encontrados em obras de terraplenagem, afeta a eficiência da estabilização do solo. A adição de nitrato reduziu a RCS dos solos em até 25%, portanto, pode ser considerado um composto nocivo para a estabilização do solo. Além disso, a influência de nitratos é altamente dependente das condições de cura e do tipo de cimento utilizado.

#### **2.5.4 Efeito de fosfatos**

Os possíveis mecanismos que os fosfatos costumam afetar a estabilização do solo podem ser inferidos a partir da literatura disponível sobre a química do cimento e do concreto. Os fosfatos são conhecidos como retardadores de hidratação do cimento, o tempo de início de pega pode ser bastante aumentado, enquanto o tempo de endurecimento pode ser bastante reduzido, pelo menos em idades adiantadas. Um estudo detalhado de Benard *et al.* (2008) sobre a hidratação de pastas de cimento em soluções ricas em fosfato demonstrou que o atraso aumenta com concentrações de fosfato de até  $25 \text{ g L}^{-1}$  mas diminui em maiores concentrações. Estes resultados foram explicados supondo dois processos concorrentes: adsorção de fosfatos sobre os de silicatos do cimento, o que atrasa a sua hidratação em baixas concentrações, e a precipitação de compostos de fosfato de cálcio em altas concentrações.

Ácido fosfórico, outro composto comumente presente em fertilizantes agrícolas, tem sido utilizado para melhorar as propriedades mecânicas dos solos (LAMBE, 1956; LYONS & MAC EWAN, 1962; INGLES & METCALF, 1972). Em ambientes ácidos, as partículas de argila são atacadas, causando a liberação de sílica e alumina que reagem com cátions da cal para formar os compostos de fosfato cimentantes entre as partículas do solo (SOKOLOVITCH, 1973; YEOH & OADES, 1981).

Com relação aos potenciais efeitos nocivos de compostos de fosfato na eficiência da estabilização do solo, Shi & Day (2000) examinaram o efeito da adição de sais ativadores ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) na cinética da reação pozolânica em uma mistura de cal-pozolana. A adição de 4% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  aumentou as resistências de curto e longo prazo de pastas de cal-pozolana com a temperatura (de 23 até  $65^\circ\text{C}$ ), acelerando o consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Estas considerações indicam que os fosfatos podem alterar a estabilização do solo com cal e cimento.

Cuisinier *et al.* mostraram que a presença de fosfatos em solo é capaz de reduzir a melhoria mecânica causada pela estabilização do solo. A queda é significativa, cerca de 20% da RCS em solos com altas concentrações de fosfato. No entanto, os autores afirmam que os resultados são muito sensíveis aos tipos de cimento e solo.

### **2.5.5 Efeito da contaminação do solo com fertilizantes químicos**

Os fertilizantes químicos são substâncias inorgânicas de origem natural ou sintética, que são aplicadas ao solo ou à planta com a finalidade de fornecer um ou mais nutrientes e que tem sua composição regulada por legislação. As unidades fertilizantes (NPK) indicam a percentagem de nitrogênio, de fósforo expresso em  $P_2O_5$ , e de potássio expresso em  $K_2O$ , presentes num fertilizante. A reação fisiológica dos fertilizantes traduz a alteração na reação do solo em resultado da sua aplicação e é quantificada pelos equivalentes de acidez e basicidade.

De acordo com o site da TRAXCO (2009), alguns fertilizantes utilizados em fertirrigação (ácido fosfórico, ácido nítrico e sulfato de amônio) tendem a acidificar a água de rega; outros (nitrato potássico, nitrato cálcico, nitrato de magnésio e sulfato potássico), pelo contrário, tendem a alcalinizá-la.

Os fertilizantes nitrogenados apresentam solubilidade em água relativamente alta e, em geral, alto índice salino e capacidade de acidificação ( $2 NH_4^+ + 3 O_2 \rightarrow 2 NO_2^- + 2 H_2O + 4 H^+$ ). O sulfato de amônio, uréia, nitrato de amônio e nitrocálcio, devido aos seus altos índices salinos, tendem a aumentar a pressão osmótica da solução do solo e, com exceção do nitrato de potássio, todos acidificam (SOUZA & FONTES, 2002).

Conforme o Dicionário Livre de Geociências (2010), a acidez ou a alcalinidade dos solos tem diferentes fontes. Nos sistemas naturais o pH é afetado pela mineralogia, clima e intemperismo. O manejo do solo sempre altera o pH natural devido ao ácido formado pelos fertilizantes nitrogenados e pela remoção de bases (potássio, cálcio e magnésio).

Teixeira *et al.* (2001) observaram incrementos significativos na acidez do solo após uso de fertilizante nitrogenado na bananeira. Purquerio & Cecílio Filho (2005) e Souza *et al.* (2006) documentaram a redução do pH do solo em função da aplicação de nitrogênio, utilizando uréia, sulfato de amônio e nitrato de amônio como fontes. Silva (1998) documenta que o pH

teve diminuição na medida em que se aumentaram as doses de nitrogênio aplicadas, independente da fonte utilizada.

A capacidade de acidificação de um fertilizante nitrogenado é representada pelo índice de acidez (quantidade de  $\text{CaCO}_3$  necessária para neutralizar a acidez originada pelo uso de 100kg do fertilizante). Para o sulfato de amônio o índice de acidez é 110, enquanto que para o nitrato de amônio o índice é de 62 (VITTI & PROCHNOW, 1996)

## 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este programa experimental tem três objetivos fundamentais. O primeiro consiste em avaliar a durabilidade de solos estabilizados com cal decorridos longos períodos de tempo. O segundo é verificar a influência da adição de fertilizantes químicos agrícolas ao solo estabilizado com cal, em comparação com o solo estabilizado sem esta adição. O terceiro e último objetivo é estudar a avaliação da perda de umidade durante o período de cura sobre a resistência final das amostras.

As variáveis deste programa podem ser classificadas em três grupos: variáveis independentes, variáveis fixas e variáveis de resposta.

As variáveis independentes são:

- *Densidade do solo-cal*: expressa pela massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ );
- *Quantidade de cal*: massa de cal dividida pela massa de solo seco, expressa em porcentagem;
- *Teor de umidade*: massa de água dividida pela massa de material seco (solo + cal), expresso em porcentagem.

As variáveis fixas são:

- *Tipos de solo*: solos residuais de basalto da Formação Serra Geral
- *Tipos de agentes cimentantes*: cal Primor Extra; cal Supercal;
- *Tempo de cura em câmara úmida*: 7, 14, 28, 56, 112 e 140 dias;
- *Tempo de cura fora de câmara úmida*: 7, 14, 28, 56, 112 e 140 dias;

- *Tipos de fertilizantes*: dois nitrogenados empregados na cultura da soja (00-20-20 e 00-25-25) e dois não-nitrogenados empregados na cultura do trigo (10-20-10 e 05-20-20)
- Taxa de deformação nos ensaios de compressão simples: 1,14 mm/min.

A variável de resposta é:

- Resistência à compressão simples (RCS).

Basicamente, este programa experimental foi dividido em duas partes. A primeira etapa consistiu-se caracterização dos solos e das cales utilizadas, com o objetivo de classificá-los e obter as informações necessárias para a execução das etapas seguintes.

A segunda etapa fundamentou-se na realização de uma vasta série de ensaios de compressão simples sobre os pontos de moldagem do pré-estabelecidos de acordo com o programa de ensaios detalhado no item 3.4. O objetivo desta etapa foi avaliar a influência das variáveis estudadas sobre a resistência à compressão simples e o comportamento da curva RCS x tempo de cura.

A Tabela 3.1 esquematiza as etapas do programa experimental, bem como o número de ensaios realizados em cada etapa.

Tabela 3.1 – Etapas e ensaios do programa experimental

ETAPA	MATERIAL	TIPO DE ENSAIO	Nº DE ENSAIOS REALIZADOS
Caracterização dos Materiais	Solo	Massa Específica Real dos Grãos	2
		Análise Granulométrica	2
		Límite de Plasticidade	2
		Límite de Liquidez	2
		Compactação	4
	Cal	Massa Específica Real dos Grãos	2
		Teor de Óxido de Cálcio	2
		Teor de Óxido de Magnésio	2
		Perda por Calcinação	2
		Óxido de Cálcio Disponível	2
		Resíduo Insolúvel	2
Resistência Mecânica	Solo	Compressão Simples	10
	Solo+Cal	Compressão Simples	108
	Solo+Cal+Fertilizante	Compressão Simples	216

No item 3.4 encontra-se detalhado o programa de moldagem e ensaios de resistência à compressão simples. Como o programa de ensaios de resistência à compressão simples se baseia em dados da caracterização dos materiais, ele será apresentado após os itens referentes aos materiais e métodos.

Os itens a seguir apresentam os métodos e os materiais utilizados, sua descrição e a justificativa de sua escolha, bem como a referência às normas técnicas obedecidas.

## **3.2 MÉTODOS**

### **3.2.1 Coleta das Amostras**

As amostras de solo foram coletadas do horizonte B das jazidas, no estado deformado, mediante escavação com ferramenta manual, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. As amostras assim obtidas foram armazenadas e transportadas em sacos plásticos adequadamente resistentes e vedados. Durante a coleta, todos os cuidados foram tomados no sentido de se evitar a contaminação da amostra principalmente por matéria orgânica.

As cales foram adquiridas em embalagens de 20 kg e armazenadas em sacos plásticos pretos, dentro de caixas plásticas herméticas visando evitar sua hidratação prematura em função da umidade do ar.

Os fertilizantes foram obtidos diretamente com agricultores. Foram separadas 4 amostras de aproximadamente 2,5 kg cada, armazenadas em sacos plásticos vedados também dentro de caixas plásticas herméticas.

### **3.2.2 Preparação das Amostras**

A preparação das amostras de solo para os ensaios de caracterização e para a moldagem dos corpos-de-prova, que envolve os procedimentos de secagem ao ar, destorroamento e determinação da umidade higroscópica seguiu os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457/86.

As amostras assim preparadas eram armazenadas em sacos plásticos até a data de sua utilização, devidamente identificados e vedados.

### **3.2.3 Ensaios de Caracterização**

Para caracterização dos solos foram utilizados os ensaios de granulometria, massa específica real dos grãos, limites de liquidez e plasticidade, compactação e determinação do teor de umidade. Para a cal utilizou-se os ensaios de teor de óxido de cálcio e óxido de magnésio, perda por calcinação, óxido de cálcio disponível e resíduo.

As determinações do teor de umidade do solo seguiram os procedimentos descritos pelo anexo da norma NBR 6457/86.

A análise granulométrica do solo foi realizada de acordo com o indicado pela NBR 7181/84. Como agente defloculante foi utilizada a solução de hexametáfosfato de sódio.

A determinação da massa específica real dos grãos de solo seguiu o método descrito pela NBR 6508/84.

A obtenção dos limites de liquidez e de plasticidade do solo seguiu os métodos preconizados nas normas NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente.

Para os ensaios de compactação foram usados os procedimentos descritos pela NBR 7182/86.

Os ensaios de caracterização da cal foram realizados pelo Laboratório de Análises Inorgânicas da Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC segundo a norma NBR 6473/03, sendo que, para as determinações de óxido de cálcio e magnésio, optou-se pelos métodos de referência contidos na própria norma (volumetria com oxalato/permanganato para CaO e gravimetria para MgO).

### **3.2.4 Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova**

Foram utilizados, para os ensaios de compressão simples, corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A confecção dos corpos-de-prova foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura.

Após a pesagem dos materiais (solo, cal, fertilizante e água) com resolução de 0,01g, o solo, o fertilizante e a cal eram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até que a mistura adquirisse coloração uniforme. Em seguida, era adicionada água continuando o processo de mistura até que a homogeneidade fosse obtida.

A quantidade de cal necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo seco utilizada, a quantidade de água (teor de umidade) em relação à soma das massas de solo seco e cal. A quantidade total de mistura permitia a moldagem de um corpo-de-prova e uma sobra para determinação da umidade.

Após a mistura dos materiais, a quantidade de solo-cal contaminado com fertilizante ou solo-cal necessária para a confecção de um corpo-de-prova era armazenada em recipientes com tampa para evitar a perda de umidade, para posterior compactação.

A amostra era, então, compactada estaticamente em três camadas no interior de um molde de PVC bipartido, devidamente lubrificado, de maneira que cada camada atingisse as especificações de teor de umidade e peso específico aparente seco, tomando-se o cuidado de escarificar levemente os topos acabados da primeira e da segunda camada para aumentar a integração entre as camadas superpostas. Do material restante no recipiente, retirava-se uma pequena porção destinada à obtenção do teor de umidade do corpo-de-prova.

Concluído o processo de moldagem, o corpo-de-prova era imediatamente extraído do molde, sua massa e medidas (diâmetro e altura) devidamente anotados com resolução de 0,01g e 0,1mm respectivamente, e acondicionado em um saco plástico duplo adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor de umidade.

Os corpos-de-prova assim obtidos eram, então, armazenados e curados pelos períodos de 7, 14, 28, 56, 112 e 140 dias em ambientes de temperatura e umidade controladas. Para este procedimento foram utilizadas a câmara úmida do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME/UFRGS) e a antiga câmara úmida do Laboratório de Geotecnologia (LAGEOTEC/UFRGS), hoje desativada, mas com temperatura praticamente constante.

Foram considerados aptos para os ensaios, os corpos-de-prova que atendiam as seguintes tolerâncias:

- Massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ): grau de compactação de 99% a 101%, sendo o grau de compactação definido como o valor de  $\gamma_d$  efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de  $\gamma_d$  definido como meta (exemplo: para  $\gamma_d = 1,80 \text{ g/cm}^3$  consideraram-se aceitáveis corpos-de-prova que apresentassem valores de  $\gamma_d$  compreendidos entre 1,78 e 1,82  $\text{g/cm}^3$ ).

- Teor de umidade ( $\omega$ ): valor especificado  $\pm 1$  ponto percentual (exemplo: para um objetivo de  $\omega = 20\%$ , seriam aceitos valores compreendidos entre 19% e 21%).
- Dimensões: diâmetro  $50 \pm 0,2\text{mm}$  e altura  $100 \pm 0,2\text{mm}$ .

### 3.2.5 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Ensaio de compressão simples têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da estabilização com cal ou acessar aspectos relativos à importância de fatores influentes sobre a resistência de solos tratados. Uma das razões para tal é a experiência acumulada com este tipo de ensaio na área de concretos, além de ser um ensaio simples, de rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico.

Porém sabe-se que, quando da utilização do solo cimentado como uma camada compactada sobre um solo de baixa capacidade de suporte, a ruptura do sistema geralmente ocorre por tração na base da camada estabilizada. Pareceria mais razoável, então, utilizar o ensaio de resistência à tração como medida direta da resistência do solo-cal. Entretanto resultados apresentados por Lovato (2004) demonstraram que a resistência à tração para um dos solos utilizados nesta pesquisa, tratado com 3%, 4% e 5% de cal cálcica e também cal dolomítica, relacionados com a resistência à compressão simples, obedecia a relação  $R_{TCD} = 0,128 \times R_{CS}$ . Este aspecto, aliado aos aspectos mencionados acima, fez com que o ensaio de compressão simples fosse adotado para a medição da influência das variáveis independentes.

Para estes ensaios foi usada uma prensa automática, com capacidade máxima de 50kN, além de um anel dinamométrico calibrado com capacidade de 5kN e resolução de 0,005kN (0,5kgf) (Figura 3.1). A velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14 mm/min. O procedimento dos ensaios de compressão simples seguiu a norma americana ASTM D 5102/96.

Os corpos-de-prova, após o período de cura, eram submersos em um recipiente com água por um período mínimo de 4 horas, visando aproximar a condição de saturação.

Imediatamente antes do ensaio de compressão simples, os corpos-de-prova eram retirados do tanque e superficialmente secos com o auxílio de um tecido absorvente. Procedia-se então o ensaio e anotava-se a carga máxima atingida pelo corpo-de-prova.



Figura 3.1 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Como critério de aceitação para o ensaio de resistência à compressão simples, estipulou-se que as resistências individuais de três corpos-de-prova não deveriam se afastar mais de 10% da resistência média deste conjunto.

Teve-se o cuidado de moldar um corpo-de-prova por vez, preparando-se a mistura para apenas um corpo-de-prova por vez. Também se evitou a moldagem dos 3 corpos-de-prova da triplicata em sequência, por exemplo, moldou-se para o teor “n” uma série denominada “a”, um para cada data de cura, em seguida moldou-se o conjunto “n – b” para as mesmas datas, e finalmente o conjunto “n – c”, constituindo então 3 corpos-de-prova do teor “n” para cada data. Estes cuidados foram tomados para evitar a perda de água entre mistura e cura, e aumentar a aleatoriedade estatística da operação.

### 3.2.6 Ensaio de Difractometria de Raios-X

Nos ensaios de difratometria de raios-x realizados em amostras de solo e misturas de solo-cal e solo-cal contaminado com fertilizante, foi utilizado um difratômetro SIEMENS, modelo D5000, com velocidade do goniômetro de 1°/min, e tubo de cobre, pertencente ao Instituto de Geociências da UFRGS.

Para identificação dos argilo-minerais presentes no solo foram ensaiadas amostras na condição orientada (natural, glicolada e calcinada), correspondente à fração menor que  $2\mu\text{m}$ . A identificação dos minerais maiores que  $2\mu\text{m}$  na amostra de solo e dos compostos formados nas misturas solo-cal e solo-cal contaminado com fertilizante foi realizada através do método do pó (também chamado de mineralogia total).

O ensaio consiste na incidência de um feixe monocromático de raios-x sobre o material a ser analisado, onde o feixe de raios-x interage com os átomos presentes na amostra, originando o fenômeno de difração. Conforme Santos (1989), a relação  $n \times \lambda = 2 \times d \times \sin\theta$  (Lei de Bragg) é a condição para a ocorrência de raios-s difratados, de comprimento de onda ( $\lambda$ ), por planos cristalinos de distância interplanar ( $d$ ). Assim, com o auxílio da Lei de Bragg, usando raios-x de comprimento de onda ( $\lambda$ ) conhecido, mede-se o ângulo de difração ( $\theta$ ), e calcula-se a distância interplanar ( $d$ ) entre os planos que originaram o fenômeno de difração. O fenômeno de difração de raios-x é mostrado na Figura 3.2.

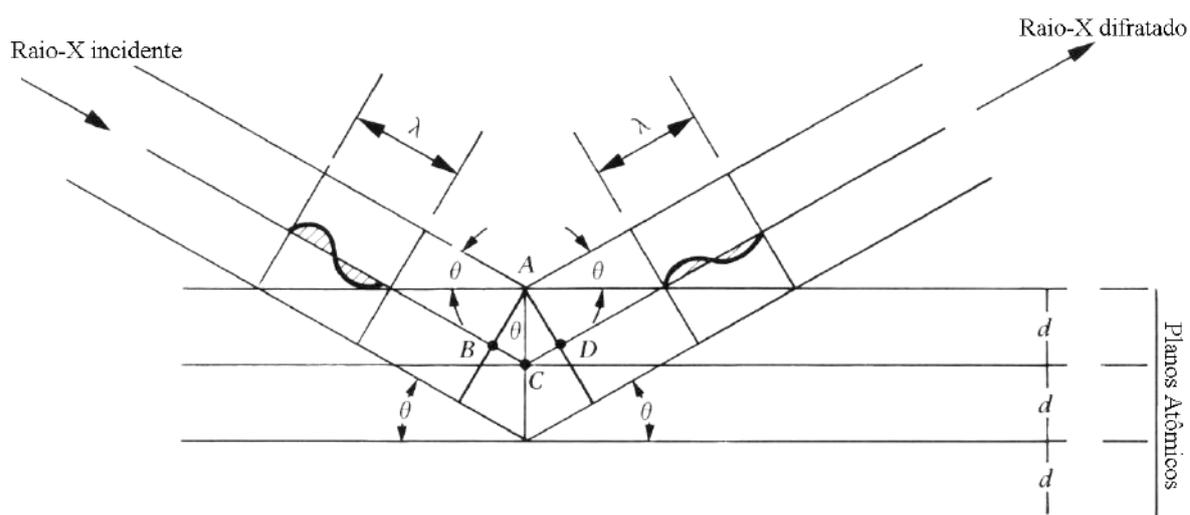


Figura 3.2 – Condições geométricas para a difração de raios-x de acordo com a Lei de Bragg (Fonte: Mitchell, 1976)

A identificação de argilo-minerais por difração de raios-x é realizada através de amostras nas formas orientada, natural e glicolada. Segundo Albers *et al.* (2001), o elevado teor de quartzo em argilas e sua facilidade de orientar-se resultam em picos bem definidos e de grande intensidade desta fase cristalina, prejudicando muitas vezes a identificação e caracterização das outras fases, como os argilo-minerais.

Assim, a preparação de amostras nas formas natural, glicolada e calcinada é realizada para minimizar a presença do quartzo e facilitar a identificação dos argilo-minerais. Parte da amostra natural é saturada com etileno-glicol (ou glicerol) para verificar a existência ou não de argilo-minerais expansivos. Outra parte da amostra é aquecida a 550°C (calcinada) durante 2 horas para identificar a presença de argilo-minerais que colapsam sua estrutura quando calcinados (vermiculita, por exemplo).

Os argilo-minerais são identificados a partir de suas distâncias interplanares (d) características, através dos picos principais e secundários, e de seu comportamento quando submetidos a glicolagem e calcinação, conforme mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Identificação dos principais argilo-minerais através de Difractometria de raios-x (Fonte: Mitchell, 1976)

Argilo-mineral	Distância Interplanar (Å) (pico principal e secundário)	Efeito da glicolagem	Efeito da calcinação (aquecimento a 550°C)
Caulinita	7,15 (001); 3,57 (002)	Nenhum	Torna-se amorfa
Ilita	10,0 (001); 5,0 (002)	Nenhum	(001) mais intenso
Clorita	14 (001); 7,0 (002)	Nenhum	(001) mais intenso
Montmorilonita	14 (001)	(001) expande a 17 Å	a 300°C (001) passa para 9,6 Å
Vermiculita	14 (001); 7,0 (002)	Nenhum	Perde o pico (001), entrando em colapso

Onde: (001) pico principal; (002) pico secundário.

### 3.3 MATERIAIS

#### 3.3.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa é um solo residual de basalto pertencente à Formação Serra Geral, em uma provável área de contato com o arenito da Formação Tupanciretã. Pedologicamente, é classificado como Latossolo Vermelho Aluminoférrico Típico.

O solo estudado foi coletado do horizonte B de uma jazida situada às margens da rodovia BR-377/RS, no km 85, próximo à cidade de Cruz Alta (jazida do km 24, no estudo de Lucena e Brugnara, 1970). A jazida, escolhida a partir dos trabalhos de Lucena e Brugnara (1970) e Lovato (2004), é caracterizada como um material argilo-arenoso, de coloração vermelha, apresentando um corte de aproximadamente 3 m de altura, com um perfil com horizonte B latossólico, semelhante ao mostrado na Figura 3.3 A localização geográfica e pedológica da jazida em estudo é apresentada nas Figuras 3.4 e 3.5.

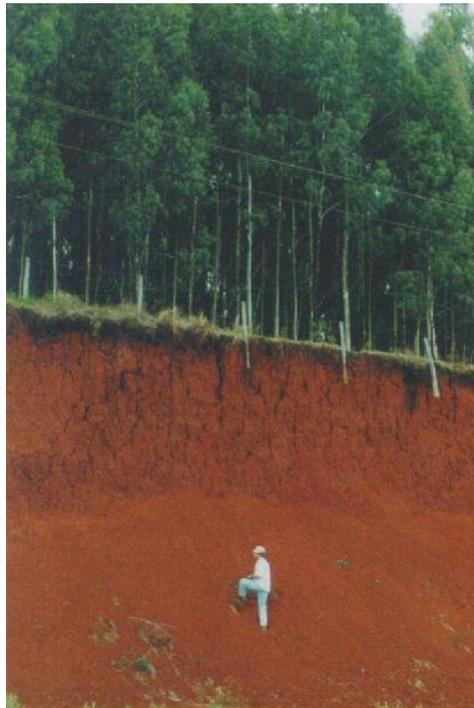


Figura 3.3 – Perfil típico de Latossolo Vermelho Aluminoférrico  
Típico da região de Cruz Alta/RS (Fonte: Streck *et al.*, 2002)

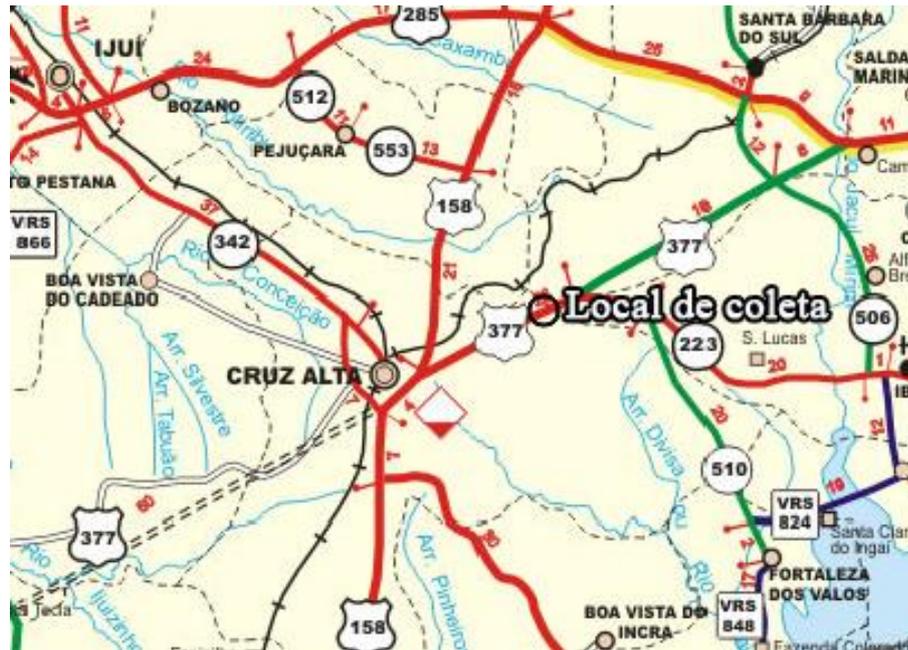


Figura 3.4 – Mapa de localização do local de amostragem (Fonte: DAER/RS – Mapa Rodoviário 2001)

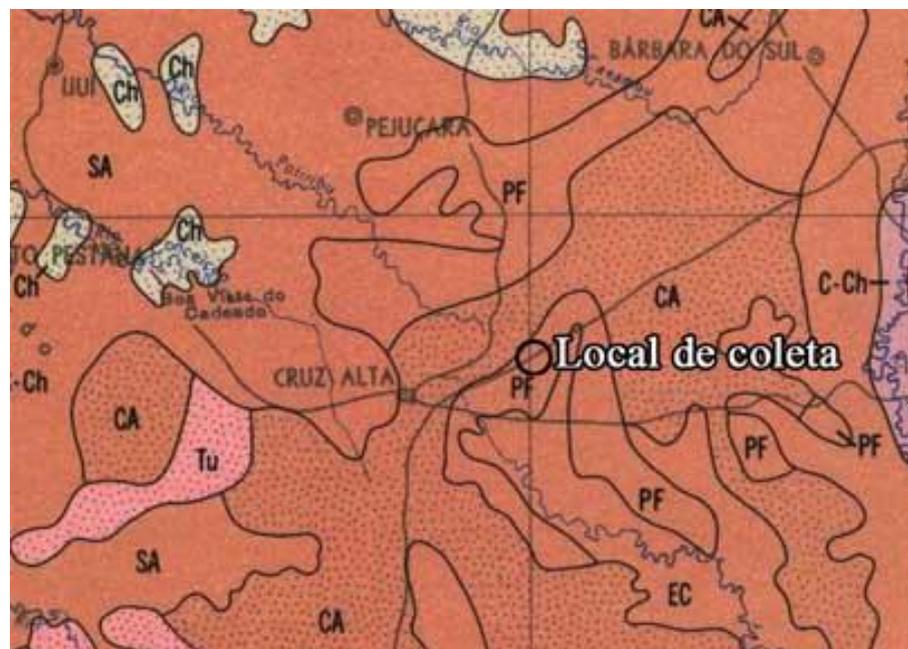


Figura 3.5 – Mapa pedológico da região de Cruz Alta/RS (Fonte: Embrapa – CNPS, 1999)

De acordo com Streck *et al.* (2002), os latossolos são solos bem drenados, normalmente profundos a muito profundos, apresentando no perfil uma sequência de horizontes A-Bw-C, onde o horizonte Bw é do tipo B latossólico. De acordo com o autor, os latossolos tem pouco ou nenhum incremento de argila com a profundidade e apresentam uma transição difusa ou gradual entre os horizontes; por isso mostram um perfil muito homogêneo, onde é difícil diferenciar os horizontes. Por serem solos muito intemperizados, tem predomínio de caulinita e óxidos de ferro, o que lhes confere uma baixa capacidade de troca catiônica (atividade da argila  $< 17 \text{ cmol}_c/\text{kg}$ ).

### 3.3.1.1 – Características do solo

A análise granulométrica do material com o uso de defloculante esta representada na Figura 3.6. Verifica-se que o material é composto por 48% de argila, 14% de silte e 38% de areia, sendo 22% de areia fina e 16% de areia média.

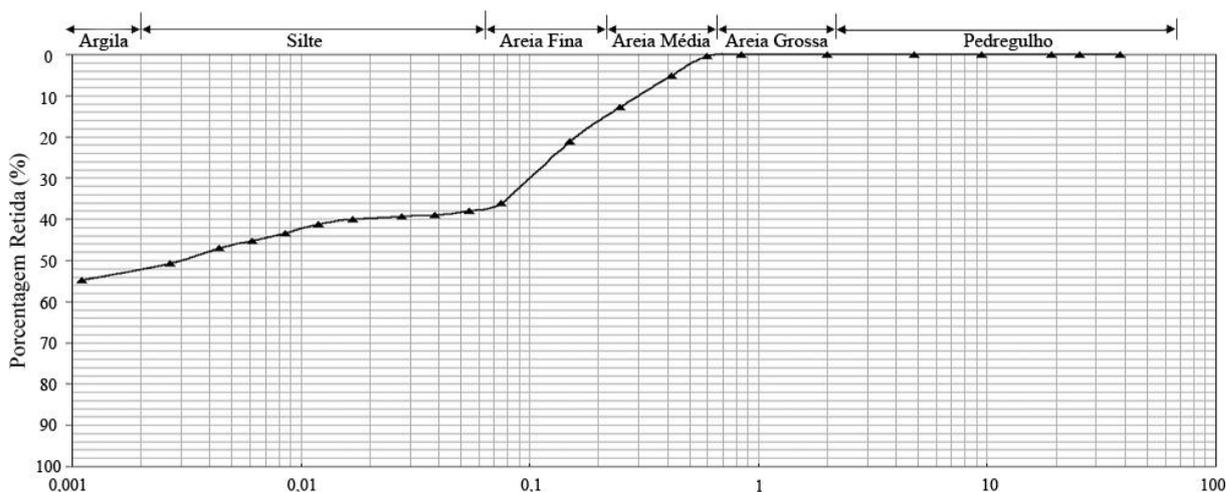


Figura 3.6 – Distribuição granulométrica do solo

A massa específica real dos grãos obtida foi de  $2,723 \text{ g/cm}^3$ . Os resultados dos Limites de Atterberg são os seguintes:

Limite de Liquidez (LL): 44,25

Limite de Plasticidade (LP): 24,68

Índice de Plasticidade: 19,57

Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS - Unified Soil Classification System), este solo é dado como CL – argila pouco plástica arenosa. De acordo com o método de classificação da AASHTO, este solo é dado como A-6.

Segundo Pinto (2002), a atividade da fração argila do solo pode ser determinada a partir do índice de atividade (Ia) proposto por Skempton (1953). O Ia indica a maior ou menor influência das propriedades mineralógicas do solo. Este solo apresentou Ia igual a 0,30, sendo classificado como inativo.

As curvas de compactação obtidas para o solo na energia intermediária são apresentadas na Figura 3.7. Os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima são:  $\gamma_{d\text{ máx}} = 1,66 \text{ gm/cm}^3$  e  $\omega_{\text{ótima}} = 20,8\%$ .

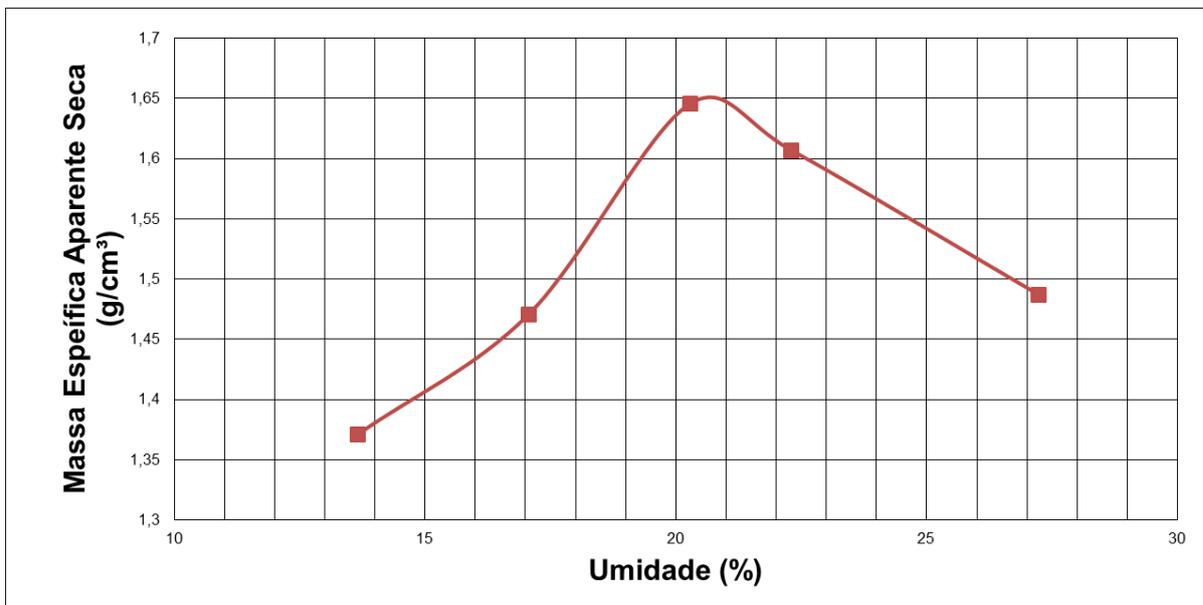


Figura 3.7 – Curva de compactação do solo

Os resultados da análise química total do solo, realizado no Laboratório de Análises de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Análise química total do solo

CARACTERÍSTICA	
pH	3,9
Fósforo	3,2 mg/dm <sup>3</sup>
Potássio	30 mg/dm <sup>3</sup>
Enxofre	13 mg/dm <sup>3</sup>
Zinco	0,3 mg/dm <sup>3</sup>
Cobre	1,1 mg/dm <sup>3</sup>
Boro	0,2 mg/dm <sup>3</sup>
Manganês	18 mg/dm <sup>3</sup>
Alumínio <sub>troc.</sub>	1,9 cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>
Cálcio <sub>troc.</sub>	0,6 cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>
Magnésio <sub>troc.</sub>	0,4 cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>
Matéria orgânica	0,5%
CTC	16,5 cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>

Os argilo-minerais presentes na fração argila do solo estudado foram identificados através de ensaios de difratometria de raios-x. A Figura 3.9 apresenta os difratogramas de raios-x da fração argila do solo.

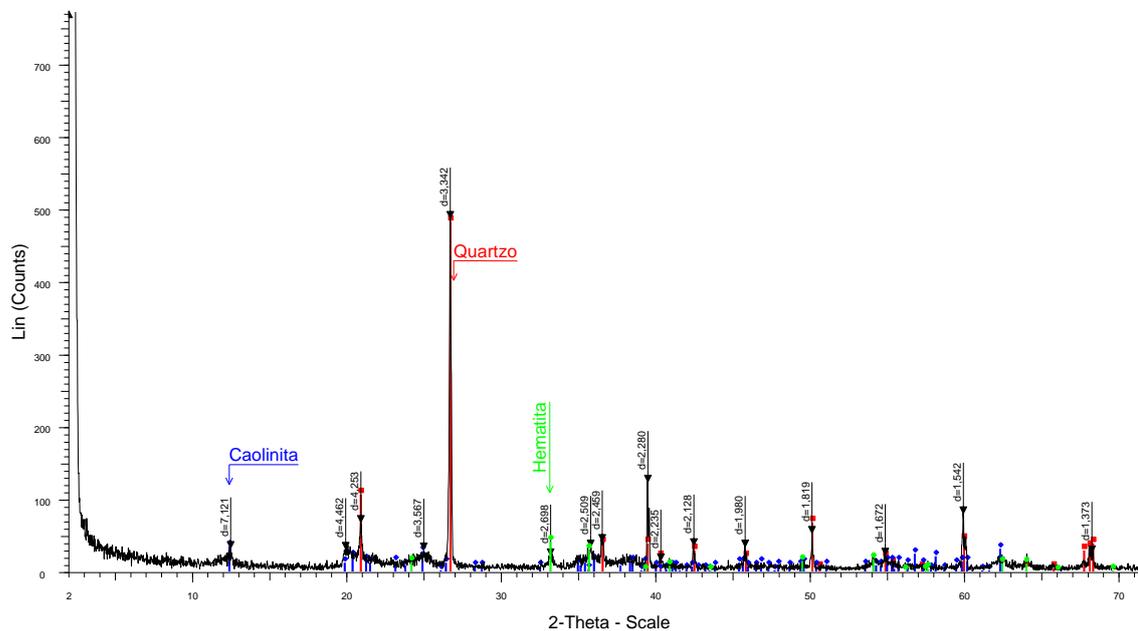


Figura 3.8 – Difratogramas de raios-x do solo

### 3.3.2 – Cal

Foram utilizados dois tipos de cal: uma cal hidratada definida como dolomítica, comercialmente chamada de “Primor Extra”, produzida pelo Grupo Dagoberto Barcelos S.A., na cidade de Caçapava do Sul – RS; e uma cal hidratada definida como cálcica e de nome comercial “Supercal”, produzida pela empresa Cobrascal Ltda, na cidade de Mairiporã – SP. A Tabela 3.4 apresenta os resultados dos ensaios químicos dos dois tipos de cal, realizados pela Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC.

Característica	Supercal	Primor Extra
Perda ao fogo (1000 ± 50°), %	24,0	23,9
Óxido de cálcio (CaO), %	61,6	41,3
Óxido de magnésio (MgO), %	9,3	27,7
Resíduo insolúvel, %	2,30	6,12
Óxidos de ferro e alumínio, R2O3, %	1,93	1,10
Óxido de cálcio (CaO) disponível, %	48,4	35,1

Tabela 3.4 – Análise química das cales utilizadas

Doravante, para melhor entendimento e simplificação das nomenclaturas, a cal “Primor Extra” será tratada como “cal dolomítica”, e a cal “Supercal” será tratada como “cal cálcica”.

### 3.3.3 – Água

A água utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova e demais ensaios onde seu uso foi necessário foi a água destilada. A água potável, proveniente da rede pública de abastecimento foi utilizada na imersão das amostras pelo período mínimo de 4 horas antes da ruptura.

## 3.4 – PROGRAMA DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES

Este trecho do capítulo descreverá o programa montado para execução de todos os corpos-de-prova e ensaios de resistência à compressão simples, nos quais se baseia este trabalho.

### **3.4.1 – Dosagem das Misturas**

#### 3.4.1.1 – Definição do Teor de Cal

O teor de 4% adotado foi escolhido a partir da experiência de Lovato (2004) que também trabalhou com este solo. Em seu trabalho, o autor relata que o solo obteve satisfatória estabilização com 3% de cal, tanto cálcica quanto dolomítica. O aumento de um ponto percentual é justificado pelas conclusões do mesmo autor, que constatou que para tal teor, as reações pozolânicas cessaram aos 56 dias, prazo menor em menores teores.

#### 3.4.1.2 – Definição do Teor de Fertilizante

Inicialmente, pensou-se em utilizar um teor de fertilizante equivalente ao teor utilizado comumente na agricultura, mas que foi desconsiderado devido as dificuldades de se trabalhar com um valor muito ínfimo de material em porcentagem de massa para um corpo-de-prova, tanto em aferição quanto em mistura. Decidiu-se então empregar o teor de 1% da massa de solos seco em fertilizante para cada corpo-de-prova.

#### 3.4.1.3 – Definição do Tempo de Cura

Os tempos de cura foram definidos a partir do tempo hábil para analisar o comportamento da resistência à compressão simples de misturas solo-cal e solo-cal contaminado com fertilizante e também do tempo necessário para que as reações químicas destas misturas ocorressem. Os tempos de cura adotados por Lovato (2004) em seu estudo também foram considerados. Logo, determinaram-se os tempos de 7, 14, 28, 56, 112 e 140 dias para determinação da curva de comportamento RCS x tempo de cura.

### **3.4.2 – Programa de Ensaio**

O programa de ensaios de compressão simples constituiu a principal etapa desta pesquisa e teve por objetivo avaliar a influência das variáveis: tempo de cura, perda de umidade durante a cura e comparação das curvas de resultados RCS das misturas solo-cal e solo contaminado com fertilizante e cal.

Os dados necessários para a moldagem dos corpos-de-prova foram obtidos pelos ensaios de caracterização já descritos. Visto a que a adição de cal provoca alterações imediatas no solo, novos ensaios de compactação foram realizados com o acréscimo de cal ao solo, buscando

visualizar valores como umidade ótima e densidade de compactação. A Figura 3.9 apresenta as novas curvas de compactação:

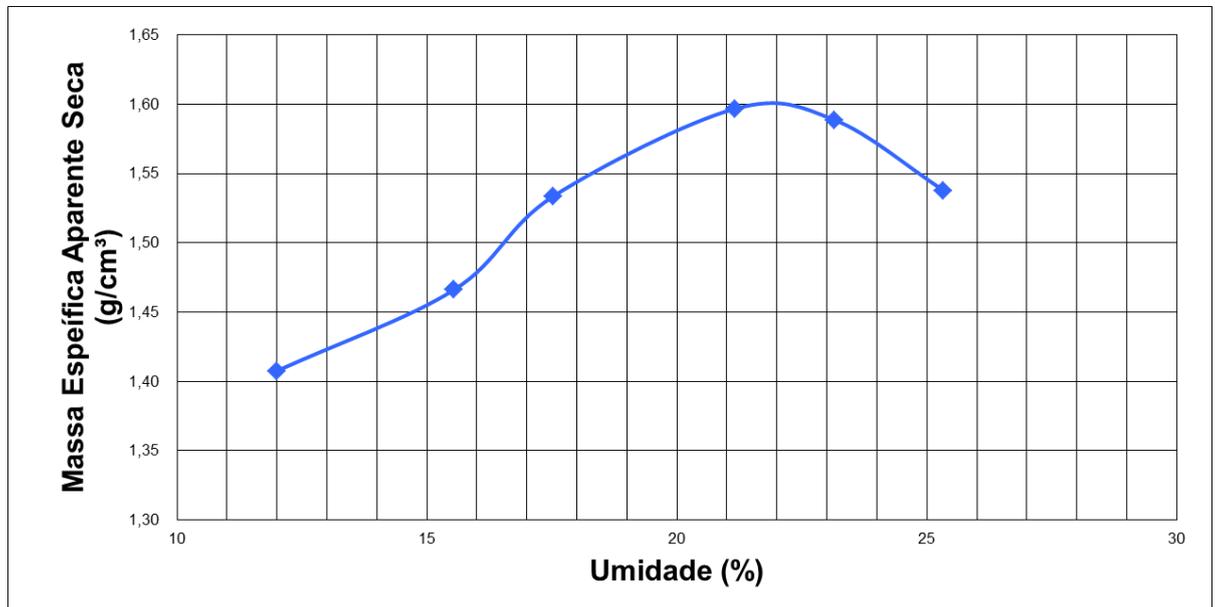


Figura 3.9 – Curva de Compactação Solo + Cal

Os valores adotados para a compactação dos corpos-de-prova do solo foram:  $\gamma_{d \text{ máx}} = 1,60 \text{ gm/cm}^3$  e  $\omega_{\text{ótima}} = 21,9\%$ .

Determinadas as características de moldagem, o programa foi posto em prática. Foram moldados um total de 334 corpos-de-prova, sendo 10 somente de solo para referência, 108 de solo+cal também para referência e o restante, 216 de solo+cal+fertilizante, objetivo principal do trabalho.

Foi empregado um rigoroso controle de moldagem, incitando o aumento da aleatoriedade estatística, minimizando possíveis erros do operador, do clima e da temperatura. Foram usados 1 solo (S1), 4 fertilizantes (F1, F2, F3 e F4) e 2 cales (C1 e C2), de onde surgiram 3 grupos de corpos-de-prova: somente solo – S1; solo + cal – S1C1 e S1C2; e solo+cal+fertilizante – S1C1F1 até S1C1F4 e S1C2F1 até S1C2F4. Para cada tempo de cura de cada conjunto solo-cal e solo-cal contaminado com fertilizante, foram moldados 3 corpos-de-prova (a, b e c) de forma que em dias ou turnos consecutivos, não se trabalhasse com a mesma cal ou o mesmo fertilizantes, desta forma temos:

Dia “n” → S1C1F1a

Dia “n+1” → S1D1c

Dia “n+2” → S1C2F2b

Dia “n+3” → S1C1F4a

...

Dia “n+n” → SnCnFnn

Cada série tem 5 tempos de cura, mas foram moldados 6 corpos-de-prova, onde este sexto teve as mesmas características de moldagem e cura e visava substituir a eventual perda de um dos outros 5 corpos-de-prova. Como não houveram perdas, este sexto corpo-de-prova foi rompido com 140 dias de cura, complementando a série de períodos de cura.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO

A Figura 4.1 apresenta as curvas de compactação do solo natural e da mistura de solo-cal na energia intermediária.

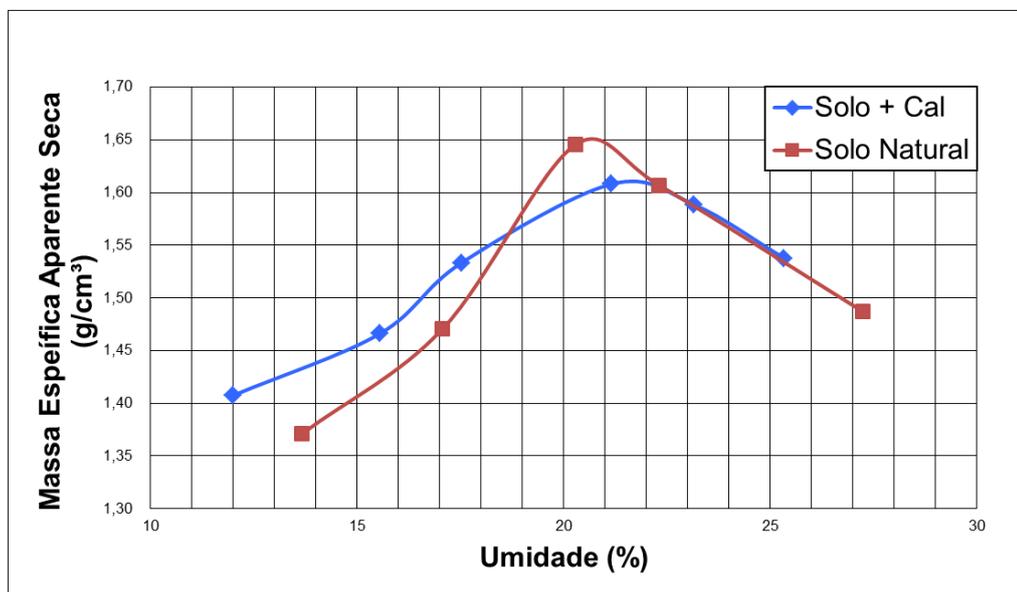


Figura 4.1 – Curvas de compactação (solo e solo-cal)

O peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima de compactação encontrados para o solo natural e para a mistura de solo e cal são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características de compactação do solo e da mistura solo-cal

Material	Peso específico aparente seco (kN/m³)	Umidade ótima (%)
Solo natural	16,5	20,8
Solo + cal	16,0	21,9

Os resultados comprovam a tendência apresentada no relatório do TRB (1987). A adição de cal proporcionou uma redução do peso específico aparente seco máximo e um aumento da umidade ótima de compactação em relação ao solo natural. Este comportamento se explica pelo fato de que as partículas do solo se tornam mais floculadas quando se adiciona cal. Assim os vazios aumentam, e a estrutura floculada será forte o suficiente para resistir à compactação com um índice de vazios mais alto, o que reduz o  $\gamma_d$  do solo. Quanto mais vazios, será necessária mais água para preenchê-los, resultando em uma umidade ótima maior (Sivapullaiah *et al.*, 1998).

ANGELIM (2005) (*apud* ARAÚJO, 2009) mencionou que a cal hidratada é ávida por água e que esta possui uma propriedade de retenção de água bastante elevada. Na discussão dos resultados dos ensaios de compactação obtidos para amostras de solo-cal, o autor comentou que os valores de umidade ótima obtidas para estas eram maiores que os da amostra de solo natural devido às partículas de cal (que substituíam uma parte das partículas de solo) apresentarem uma massa específica inferior aos das partículas de solo.

De acordo com Ormsby e Kinter (1973), o tipo de cal não tem grande influência nas características de compactação ( $\gamma_d$  e  $\omega_{ótima}$ ), o que foi confirmado no estudo de Lovato (2004) com o mesmo solo e as mesmas cales deste trabalho.

## **4.2 EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO ESTABILIZADO**

A resistência à compressão simples (RCS) é uma característica muito importante na análise da estabilização de um solo pela cal. Os valores de RCS são utilizados na análise de materiais estabilizados, quando da aplicação do método de dimensionamento empírico de camadas de pavimentos.

As tabelas A.1, A.2... A.13 do apêndice “A” apresentam as características de todos os corpos-de-prova ensaiados à compressão simples, cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas no programa experimental.

Neste estudo foram empregados 4 tipos de fertilizantes, escolhidos a partir do seu uso nas culturas agrícolas cultivadas na região objetivando estudar o efeito da contaminação com estes produtos em solos estabilizados com cal. Destes fertilizantes, 2 são definidos como

nitrogenados, apresentando teores de nitrogênio em sua composição e são empregados na cultura de trigo, com teores comerciais são 05-20-20 e 10-20-10, sendo, em ordem, nitrogênio, fósforo e potássio. Os outros 2 fertilizantes são não-nitrogenados, empregados na cultura da soja e com teores comerciais são 00-25-25 e 00-20-20 (N-P-K, respectivamente).

A partir dos dados constantes nas tabelas A.1 e A.2, foram elaboradas as Tabelas 4.2 e 4.3, onde alguns aspectos relevantes do comportamento solo contaminado com fertilizante e cal são evidenciados.

Tabela 4.2 – Evolução da resistência à compressão simples de misturas de solo contaminado e cal cálcica (kN/m<sup>2</sup>)

Tipo de cal		Cálcica				
Teores N-P-K		-	00-20-20	00-25-25	05-20-20	10-20-10
Tempo de cura (dias)	7	421,61	326,62	294,61	408,75	381,33
	14	503,89	364,33	327,62	453,28	436,38
	28	580,32	389,40	349,64	482,43	460,27
	56	707,28	438,50	363,15	507,66	471,04
	112	685,19	449,06	420,81	553,40	479,28
	140	706,25	473,26	458,17	558,83	518,60

Tabela 4.3 – Evolução da resistência à compressão simples de misturas contaminadas e cal dolomítica (kN/m<sup>2</sup>)

Tipo de cal		Dolomítica				
Teores N-P-K		-	00-20-20	00-25-25	05-20-20	10-20-10
Tempo de cura (dias)	7	327,97	270,57	250,66	293,40	278,72
	14	337,96	272,36	251,76	313,99	293,12
	28	348,12	281,82	270,63	319,87	302,00
	56	351,17	273,97	268,88	322,50	310,21
	112	359,81	266,76	251,87	331,81	313,29
	140	359,83	263,24	244,35	330,80	313,46

A partir dos dados apresentados nas tabelas anteriores, elaboraram-se os gráficos das Figuras 4.2 e 4.3 onde se pode visualizar melhor a evolução do processo de estabilização ao longo dos períodos de cura, enfatizando-se o efeito da contaminação do solo com fertilizantes.

A grande maioria dos corpos-de-prova apresentou uma ruptura frágil à compressão simples, característica de materiais cimentados. A Figura 4.4 mostra a forma de ruptura de algumas amostras representativas dos corpos-de-prova que apresentaram resultados válidos nos ensaios de determinação da resistência à compressão simples. Observou-se, na maioria dos casos, que a superfície de ruptura passou pela base dos corpos-de-prova.

Também é possível observar na Figura 4.4 a formação de um ou mais planos de ruptura bem definidos. Em geral, o ângulo formado entre o plano de ruptura e o plano onde atua a tensão principal maior fica entre  $60^\circ$  e  $70^\circ$ .

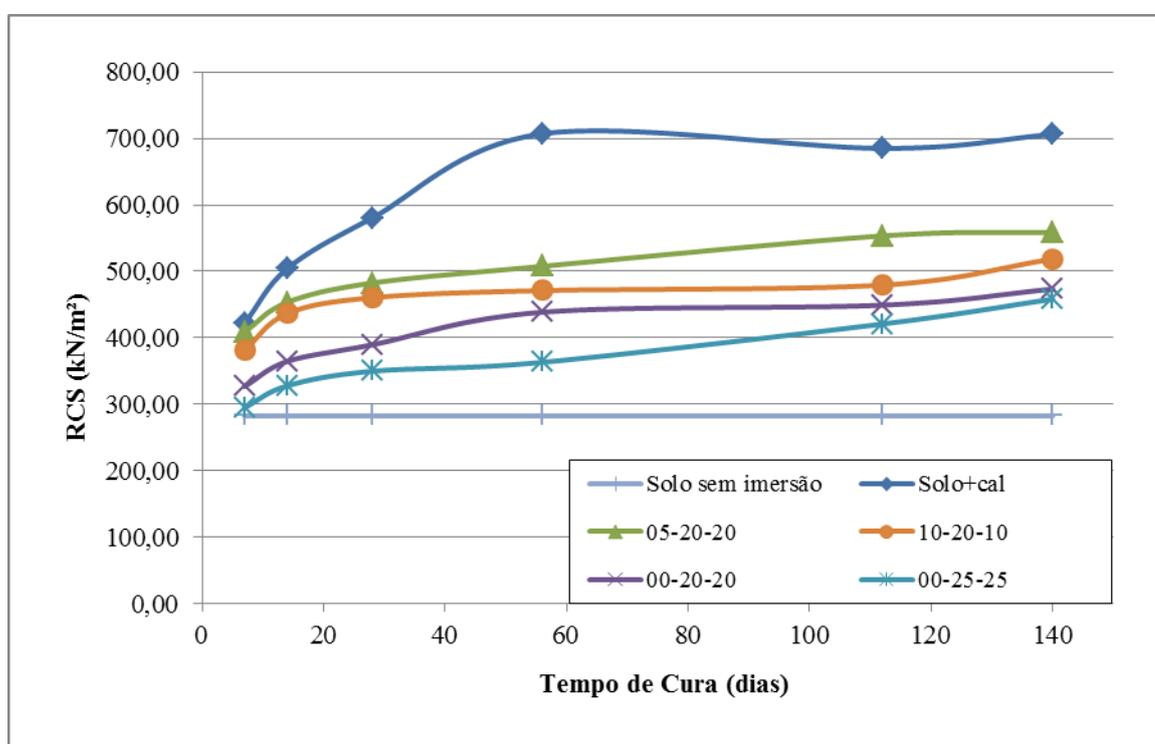


Figura 4.2 – Evolução da RCS das misturas com cal cálcica em função do tempo de cura

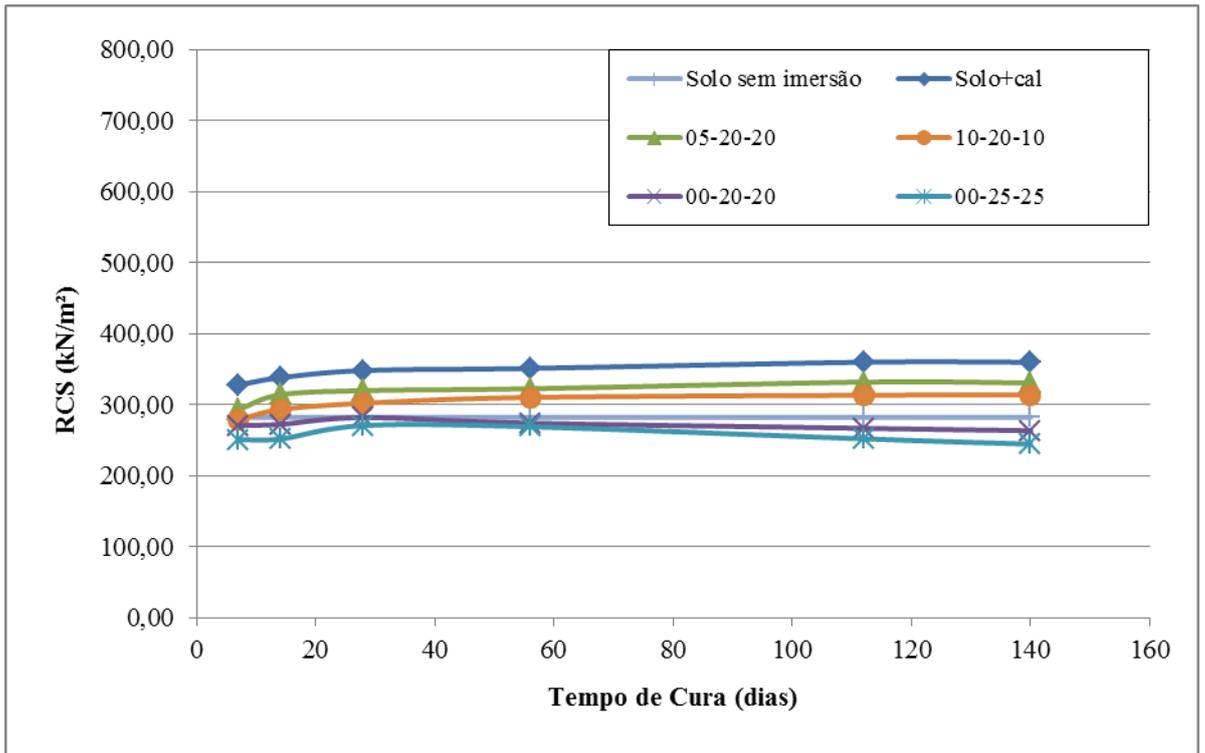


Figura 4.3 – Evolução da RCS das misturas com cal dolomítica em função do tempo



Figura 4.4 – Padrão característico de ruptura dos corpos-de-prova submetidos à compressão simples

A seguir são discutidas as influências das variáveis: tipo de cal, tempo de cura, tipo de fertilizante e tipo de cura que influenciaram na resistência à compressão simples das misturas de solo-cal e solo contaminado com fertilizante e cal.

### 4.2.1 Influência do tipo de cal e do tempo de cura no solo não contaminado

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de cales já descritos anteriormente, uma definida como cálcica e outra como dolomítica. A Figura 4.5 apresenta a evolução dos ganhos de resistência à compressão simples em função do tempo de cura.

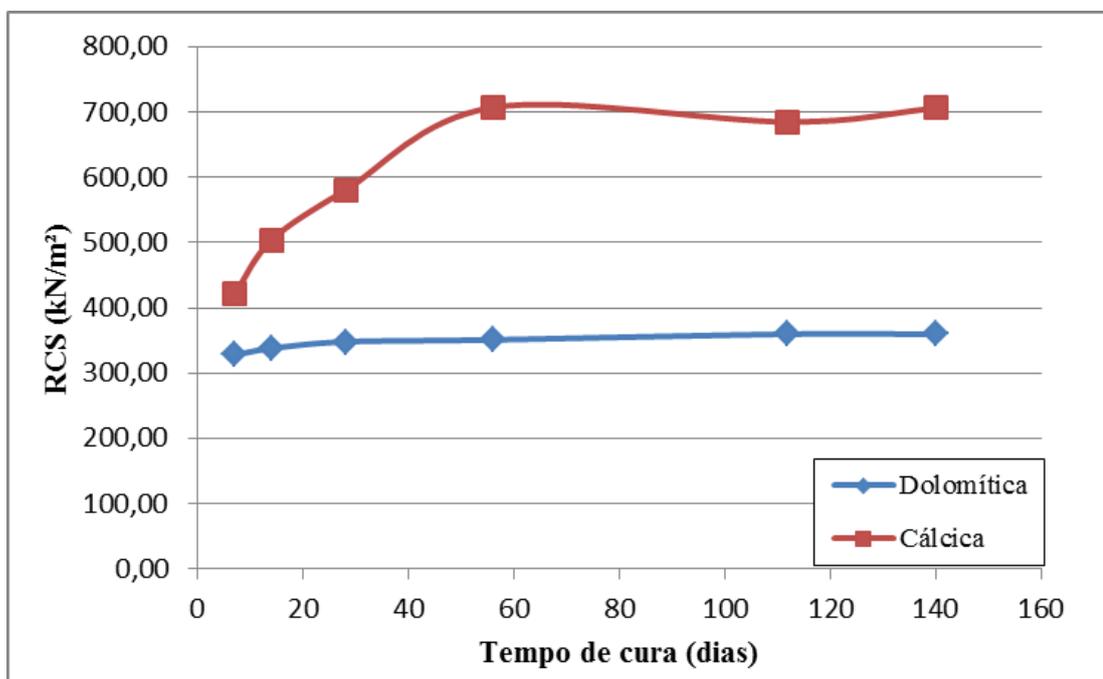


Figura 4.5 – Variação da RCS para cada tipo de cal

A Figura 4.5 confirma os estudos de Ormsby & Kinter (1973) que afirmaram que solos ricos em caulinita apresentam resultados melhores quando estabilizados com cal cálcica; e de Lovato (2004), que observou ganhos de RCS superiores de 28 a 55% nas misturas de solo-cal cálcica em relação às misturas de solo e cal dolomítica.

Para a mistura com cal cálcica, pode-se observar que o aumento da resistência foi bem maior que da cal dolomítica, partindo próximo de 421 kN/m<sup>2</sup> aos 7 dias de cura e chegando a aproximadamente 707 kN/m<sup>2</sup> aos 56 dias de cura. Este comportamento permite supor que as reações pozolânicas cessaram aos 56 dias de cura. Fato semelhante foi observado por Lovato (2004) ao estabilizar um latossolo da região de Cruz Alta com 4% de cal cálcica, mesmo teor empregado neste trabalho. As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam os ensaios de difratometria de raios-X do solo natural e da mistura de solo-cal cálcica após 112 dias de cura em câmara úmida.

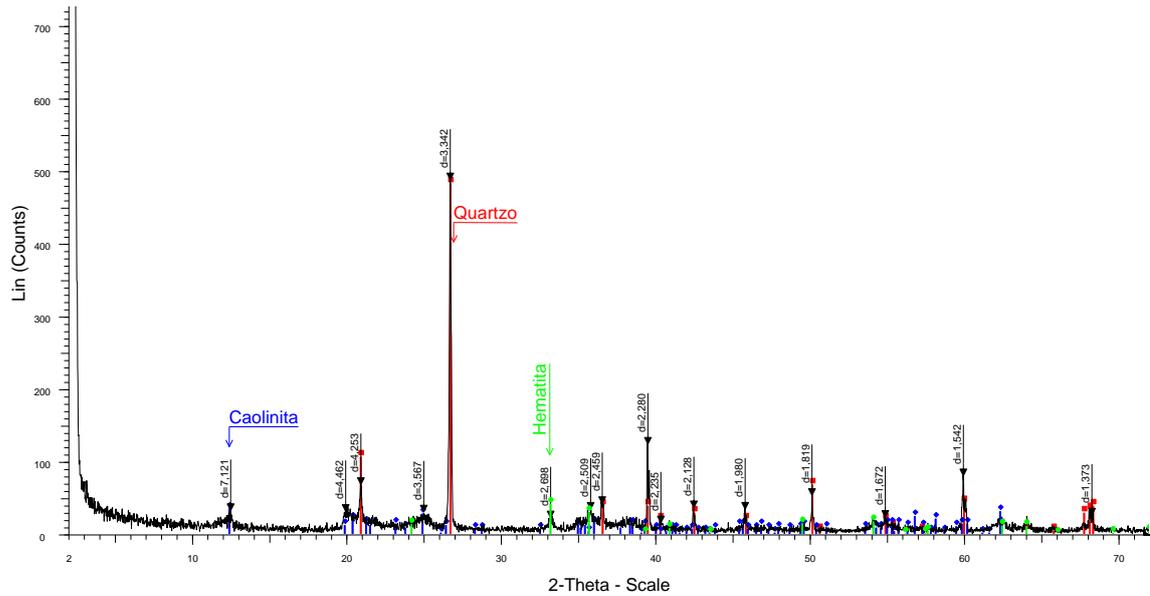


Figura 4.6 – Difratomia de raios-X do solo

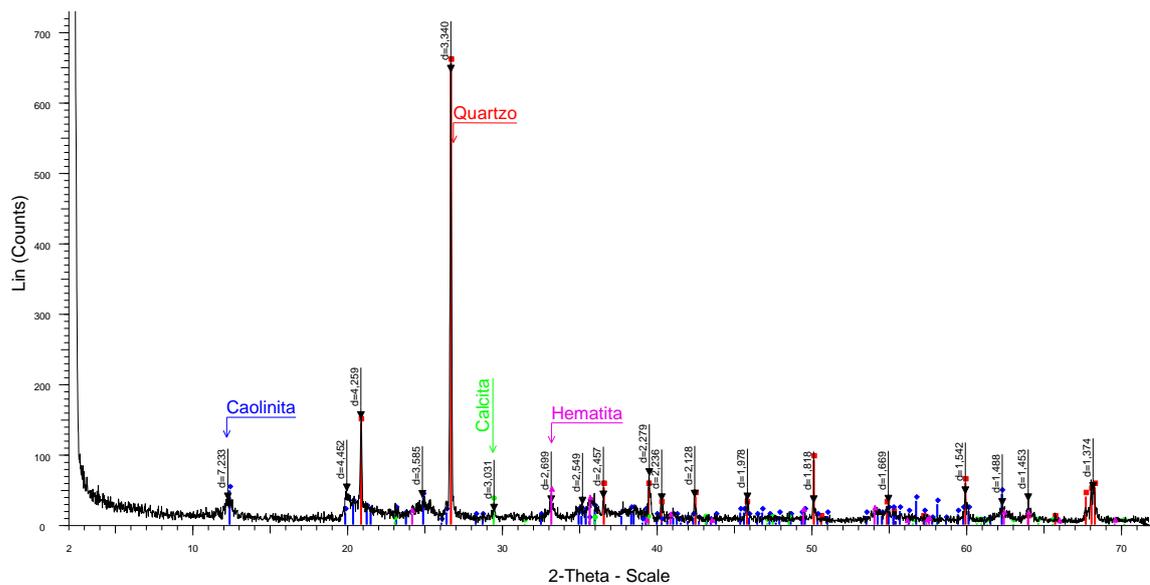


Figura 4.7 – Difratomia de raios-X da mistura solo-cal cálcica

A mistura com cal dolomítica não apresentou ganhos representativos de resistência, partindo próximo de 328 kN/m<sup>2</sup> aos 7 dias de cura, tendo um máximo de resistência de aproximadamente 360 kN/m<sup>2</sup> aos 112 dias de cura, mantendo-se próximo disso aos 140 dias. Salienta-se que a RCS aos 28 dias de cura é de apenas 348kPa; como Thompson (1966) definiu como solo reativo à cal aquele que experimentar ganho de RCS maior ou igual a 345kPa após 28 dias de cura a temperatura de 22,8°C, e não reativos aqueles com ganho

inferior a 345kPa, conclui-se então que este solo é muito pouco reativo à cal dolomítica. Pode-se então supor que, apesar do pequeno ganho de resistência, as reações pozolânicas cessaram aos 112 dias, uma vez que de 112 para 140 dias de cura não houve aumento de resistência dentro das margens de erro empregadas neste estudo.

A Figura 4.8 apresenta o gráfico obtido no ensaio de difratometria para amostras de solo-cal dolomítica após 112 dias de cura em câmara úmida.

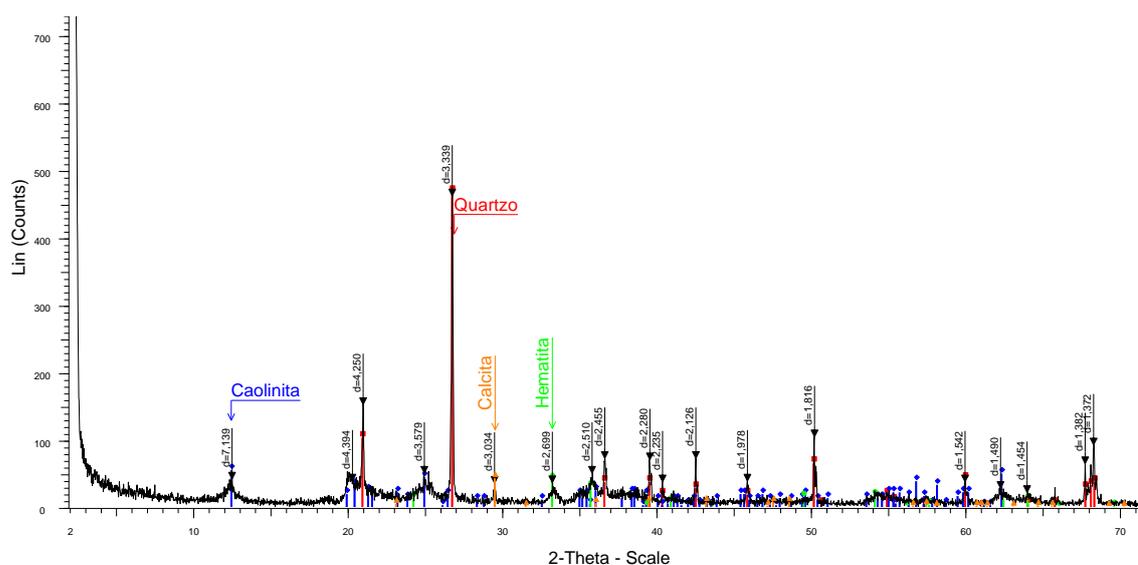


Figura 4.8 – Difratometria de raios-X da mistura solo-cal dolomítica

Os picos de difração verificados evidenciaram a presença de quartzo, caulinita e hematita no solo natural, e a formação de calcita na amostra da mistura de solo-cal cálcica e solo-cal dolomítica. Apesar de aparecer no ensaio como calcita, é mais provável que este material formado seja um produto cimentante originado das reações do solo com a cal, possivelmente um silicato hidratado de cálcio (C-S-H). De acordo com Chen *et al.* (2004) os silicatos hidratados de cálcio possuem um nível considerável de complexidade estrutural, mais de 30 fases cristalinas do mesmo sendo conhecidas, e amostras preparadas para o ensaio à temperatura ambiente têm estruturas variando de semicristalino a quase amorfo.

É importante observar que não somente o tipo de cal pode ser importante na RCS do solo estabilizado, mas também a composição química do solo. No estudo de Lovato (2004) com um solo semelhante, foi constatada uma Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo de 9,1 cmol/dm<sup>3</sup> e teor de enxofre (possível fonte de sulfatos) de 9,1 mg/dm<sup>3</sup>. O solo empregado na pesquisa relatada nesta dissertação apresentou CTC de 16,5 cmol/dm<sup>3</sup> e teor de enxofre de 13

mg/dm<sup>3</sup>. Assim, a composição química do solo é extremamente importante nos ganhos de RCS decorrentes da estabilização com cal. Destaca-se que, embora estes dois solos sejam classificados pedologicamente como latossolos, o teor de enxofre no solo alvo desta dissertação é quase 50% superior ao presente no latossolo estudado por Lovato (2004), o que pode justificar as menores resistências alcançadas no presente estudo, a despeito de incorporar-se o mesmo teor de cal.

#### **4.2.2 Influência do tipo de cura**

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de cura, o primeiro tipo, chamado aqui de “cura em câmara úmida”, foi feito na câmara úmida do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), que mantém temperatura constante e controlada; o segundo tipo, chamado “cura fora de câmara úmida” neste trabalho, foi feito na antiga câmara úmida do Laboratório de Geotecnologia (LAGEOTEC), hoje desativada e sem controle de umidade, mas com temperatura praticamente constante.

Durante o período de agosto de 2010 a janeiro de 2011 foram feitas de uma a duas leituras diárias de temperatura em ambas as câmaras, onde foram instalados termômetros analógicos. Tentou-se englobar no período de medição de temperaturas parte do inverno e parte do verão, de modo que fosse possível observar a variação de temperatura dentro das câmaras quando no exterior destas o gradiente térmico era bastante elevado.

As figuras 4.9 e 4.10 apresentam as evoluções de resistência das misturas solo-cal para cada tipo de cal e ambos os tipos de cura.

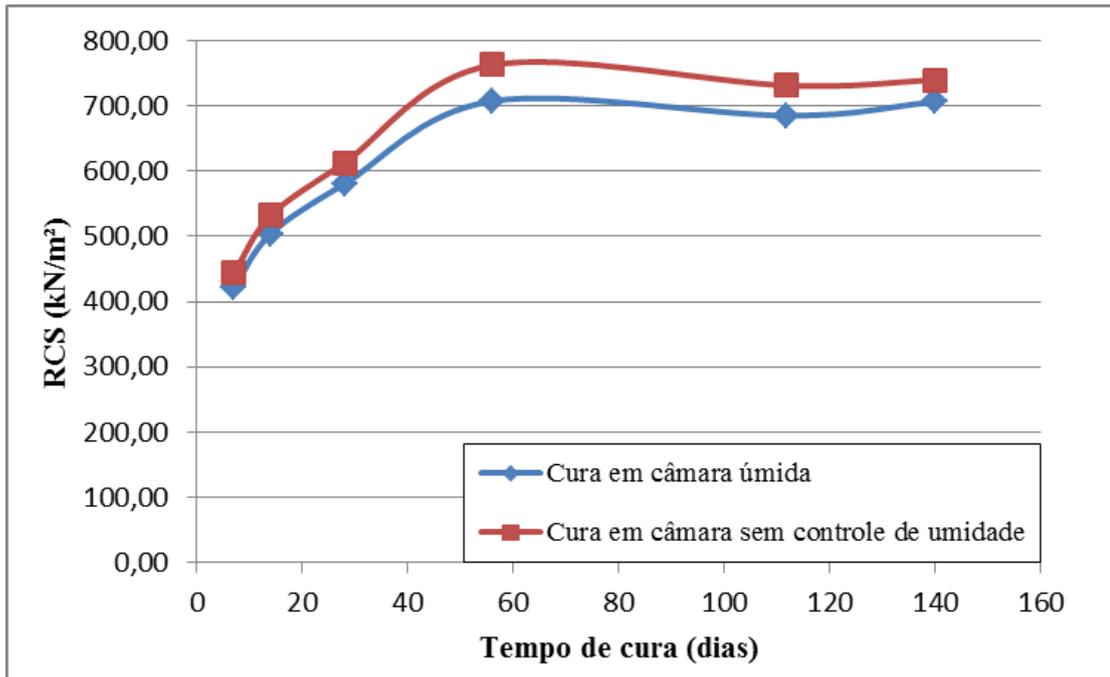


Figura 4.9 – Evolução da RCS de misturas solo-cal cálcica em função do tipo e tempo de cura

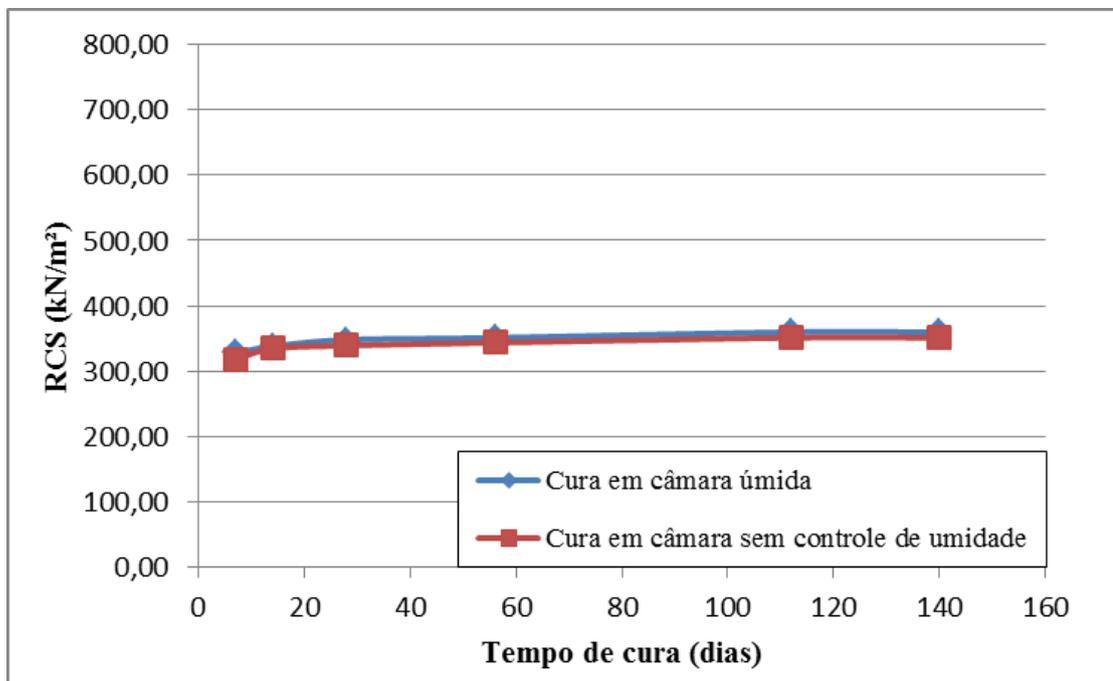


Figura 4.10 – Evolução da RCS de misturas solo-cal dolomítica em função do tipo e tempo de cura

A Figura 4.11 apresenta o gráfico obtido no ensaio de difratometria de raios-X para a amostra de solo-cal cálcica submetido a 112 dias de cura na câmara sem controle de umidade.

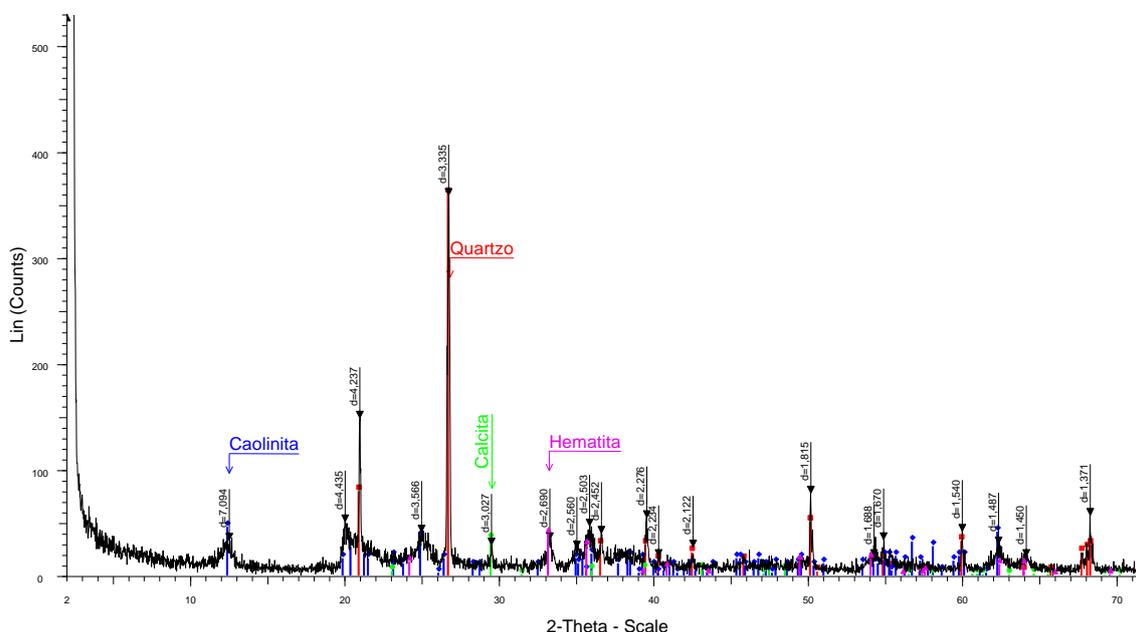


Figura 4.11 – Difratometria de raios-X da mistura solo-cal cálcica de cura em câmara sem controle de umidade

A cura em câmara úmida teve uma temperatura média de 24,8°C, com mínimas de 24°C e máximas de 26,5°C; a cura fora de câmara úmida teve temperatura média medida de 25,4°C, com mínimas de 23,5°C e máximas de 27°C.

Vários autores (GLENN, 1963; WANG, 1966; RUFF E HO, 1966) (*apud* NÓBREGA, 1985) observaram a ocorrência de minerais de neoformação diferentes, tanto em função do tempo como da temperatura, para misturas semelhantes. Essas variações são acompanhadas, em termos mecânicos, por aumento da capacidade de suporte. Para os autores este ganho de resistência é devido às diferentes fases do complexo de reação.

Pinto (1985), afirma que a cura em temperaturas elevadas provoca um ganho de resistência muito rápido, o que foi verificado sistematicamente por vários pesquisadores.

Decidiu-se por avaliar a variação do grau de saturação dos corpos-de-prova em três diferentes momentos, logo após a compactação, imediatamente após a retirada das câmaras de cura e imediatamente depois do período de imersão.

A Figura 4.12 apresenta a variação do grau de saturação dos corpos-de-prova da mistura de solo e cal cálcica submetida à cura em câmara sem controle de umidade imediatamente após a moldagem (pré-cura), após a cura e após a imersão.

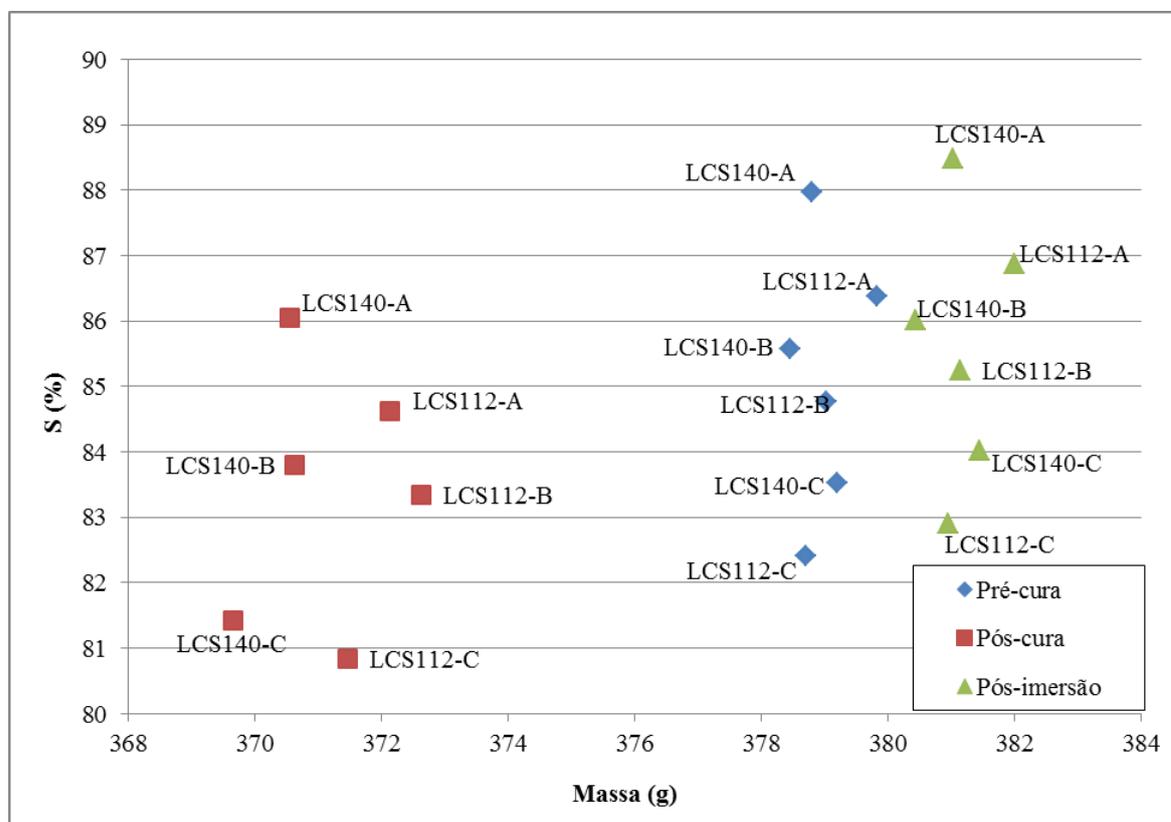


Figura 4.12 – Variação do grau de saturação da mistura solo-cal cálcica de cura em câmara sem controle de umidade

Os corpos-de-prova são identificados por um código composto pelas letras LC – latossolo estabilizado com cal cálcica, pela letra S, que significa cura em câmara sem controle de umidade, 3 números constituindo o tempo de cura em dias, e a última letra (A, B, C) correspondendo ao CP considerado (lembra-se que eles foram moldados em triplicata).

Pode-se observar a partir da Figura 4.12 que houve pequena variação do grau de saturação das amostras, apesar da elevada perda de peso durante a cura, o que era esperado devido à condição de armazenamento, pois a câmara usada para cura sem controle de umidade mantinha apenas temperatura constante.

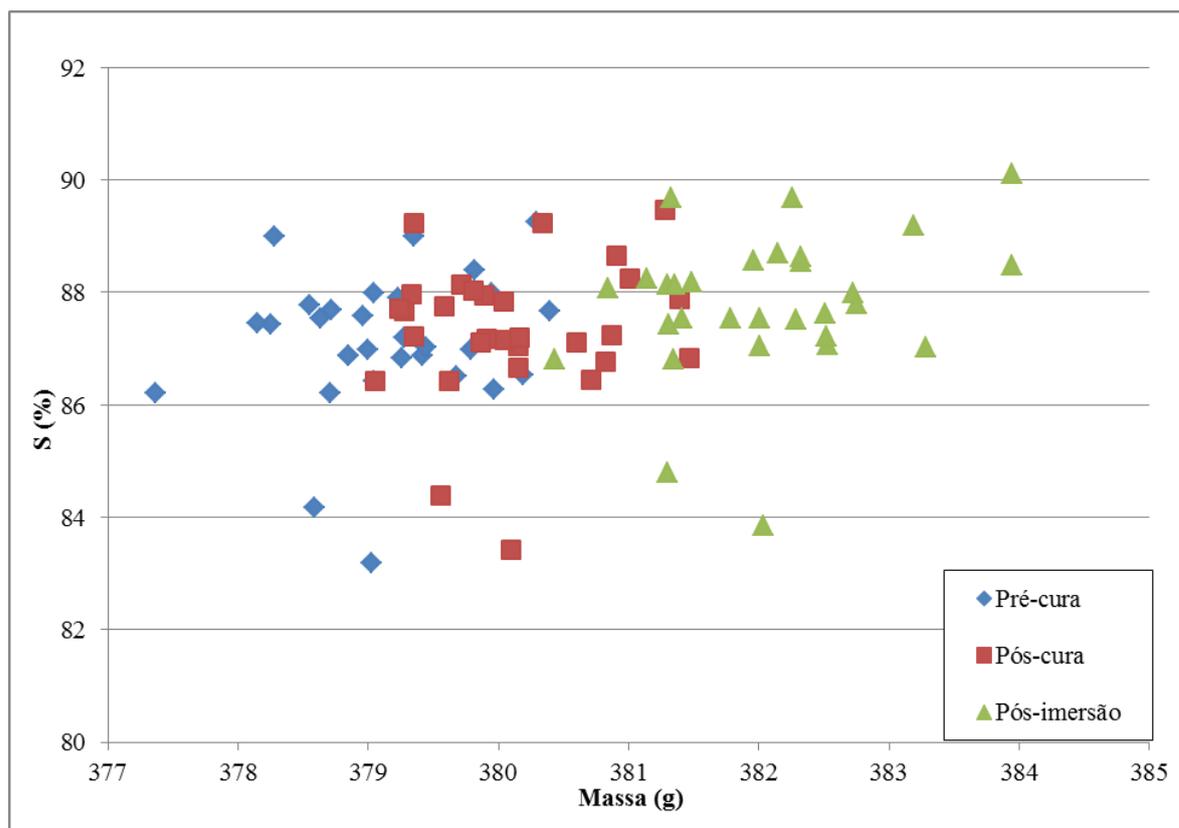


Figura 4.13 – Variação do grau de saturação da mistura solo-cal cálcica de cura dentro de câmara úmida

Na Figura 4.13 apresenta-se a mesma evolução para corpos-de-prova curados no interior da câmara úmida, com controle de umidade, por 112 e 140 dias.

Confirmando o observado na condição de cura sem controle de umidade, a variação do grau de saturação foi bastante pequena, apesar do pequeno ganho de peso durante a cura. O mesmo comportamento se repete para a cal dolomítica, conforme as Figuras 4.14 e 4.15 demonstram.

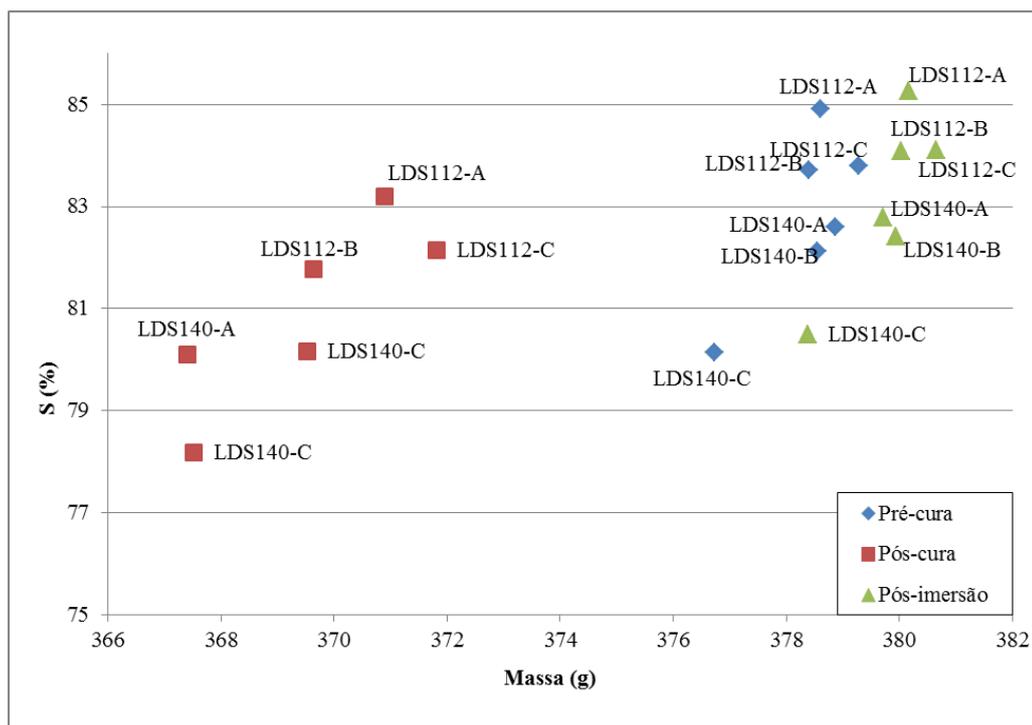


Figura 4.14 – Variação do grau de saturação da mistura solo-cal dolomítica de cura em câmara sem controle de umidade

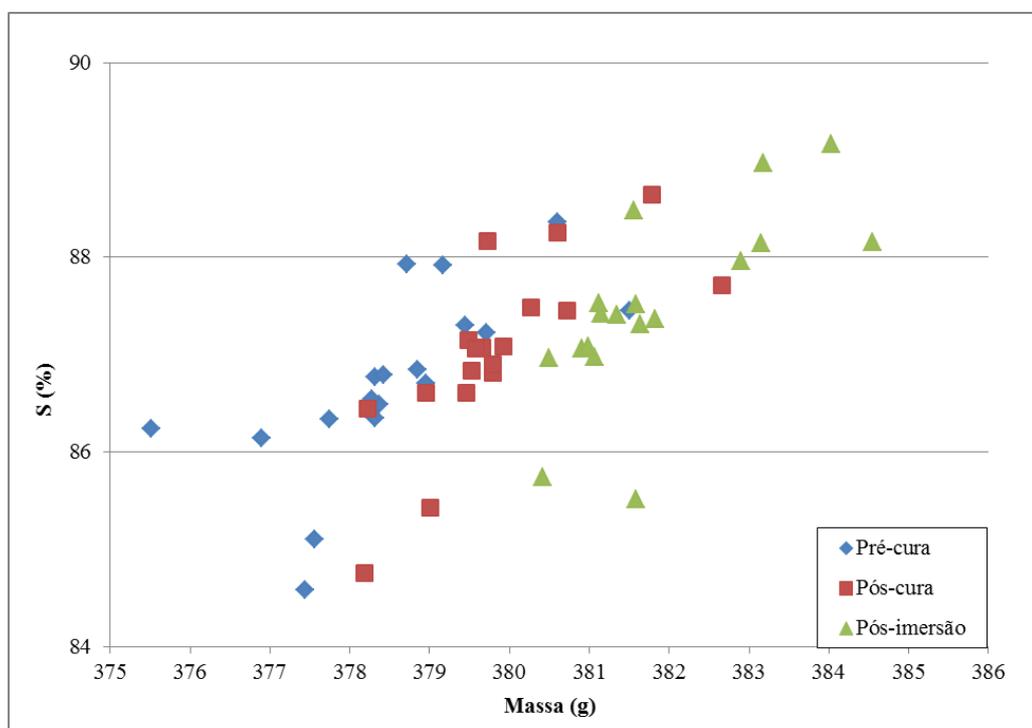


Figura 4.15 – Variação do grau de saturação da mistura solo-cal dolomítica de cura dentro de câmara úmida

A partir da análise dos gráficos, é possível observar que o grau de saturação não tem uma variação considerável (queda média de 3,6% e aumento médio de 5,3% para cal dolomítica e 4,7% e 2,6% de queda e aumento respectivamente para cal cálcica), independente do tipo de cura (em câmara úmida ou em câmara sem controle de umidade). Apesar da variação de peso ser maior na cura seca, o grau de saturação manteve-se próximo nos três momentos de aferição. Pode-se então dizer que a variação do grau de saturação não teve nenhum tipo de influência sobre a variação do ganho de resistência.

#### **4.2.3 Influência da contaminação com fertilizante na resistência à compressão simples do solo estabilizado**

Já foi mencionado que neste estudo foram empregados 4 tipos de fertilizantes, escolhidos a partir do seu uso nas culturas agrícolas cultivadas na região. Destes, 2 são definidos como nitrogenados, apresentando teores de nitrogênio em sua composição e são empregados na cultura de trigo, seus teores comerciais são 05-20-20 e 10-20-10, sendo, em ordem, nitrogênio, fósforo e potássio. Os outros 2 fertilizantes são não-nitrogenados, empregados na cultura da soja e cujos teores comerciais são 00-25-25 e 00-20-20.

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam as evoluções de resistência das misturas de solo contaminado com fertilizante e cal cálcica e dolomítica respectivamente, bem como as de misturas com solos não contaminados.

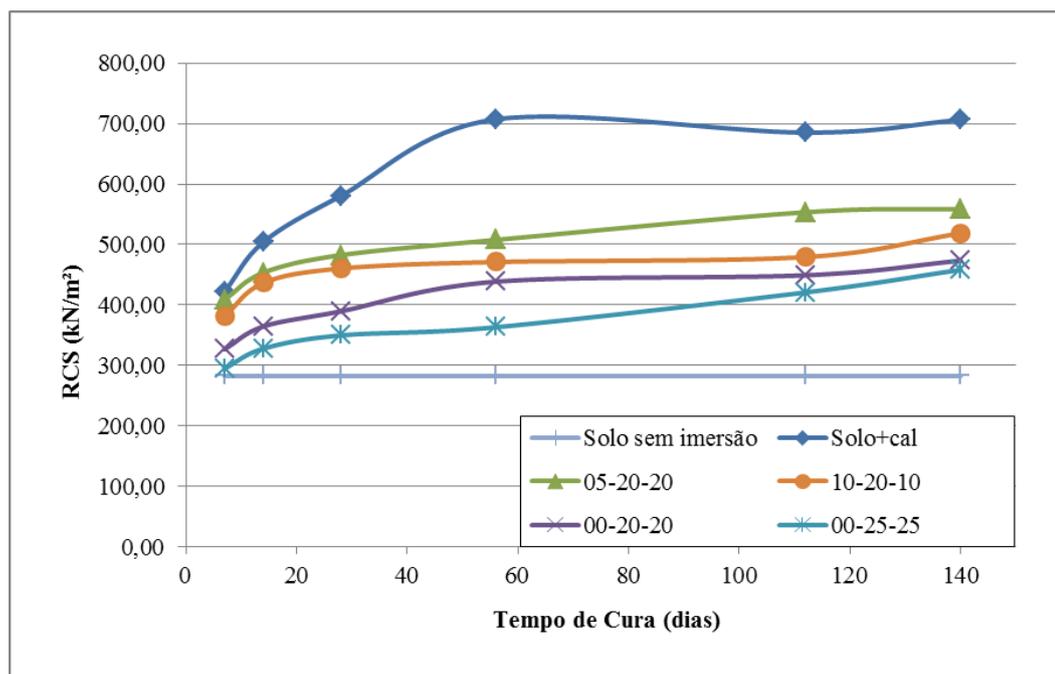


Figura 4.16 – Evolução RSC das misturas com cal cálcica em função do tempo de cura

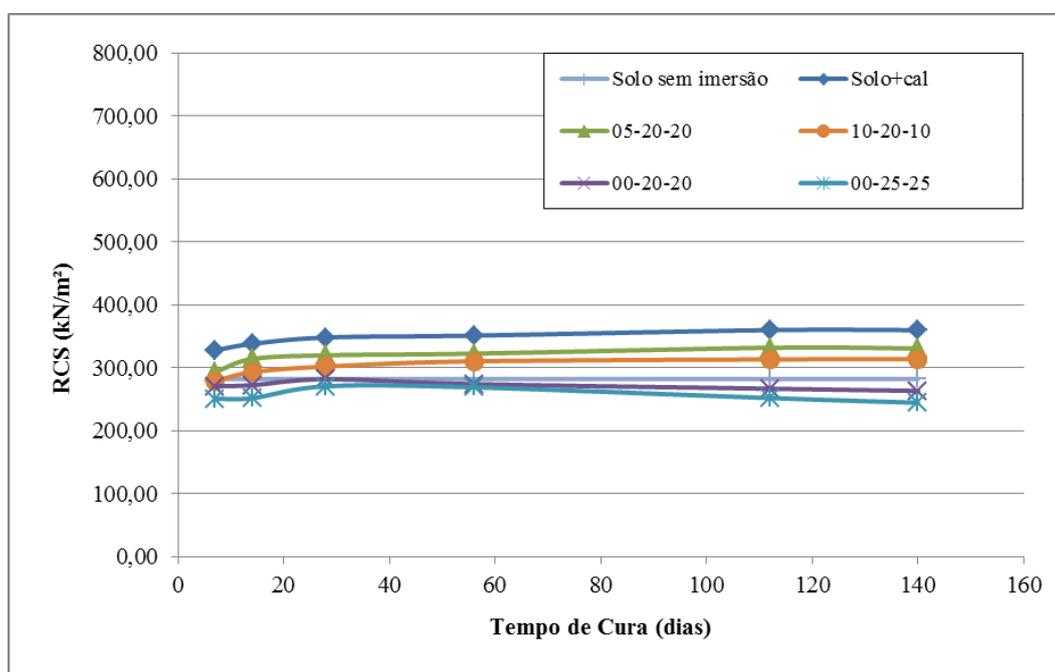


Figura 4.17 – Evolução RSC das misturas com cal dolomítica em função do tempo de cura

Os resultados apresentados na Figura 4.16 e 4.17 mostraram que:

- a) Todos os fertilizantes que contaminaram o latossolo estabilizado com cal causaram redução do ganho de RCS em comparação às misturas em solo não contaminado. Após 140 dias de cura em câmara úmida a RCS do solo não contaminado estabilizado com cal atingiu 706kPa; enquanto que a resistência dos corpos-de-prova contaminados e cal variou de 458 a 558kPa.
- b) Os fertilizantes não-nitrogenados causaram maiores perdas de resistência que os nitrogenados. Por exemplo, o solo contaminado com fertilizante 00-20-20 (N-P-K) estabilizado com 4% de cal cálcica atingiu RCS de 473kPa aos 140 dias de cura, enquanto que o solo contaminado com fertilizante 05-20-20 estabilizado com o mesmo tipo e teor de cal e após o mesmo tempo de cura alcançou RCS de aproximadamente 559kPa ( $\approx 18\%$  maior).
- c) Entre os fertilizantes nitrogenados, o 05-20-20 causou menor perda de RCS que o 10-20-10, sugerindo que o teor de potássio também pode afetar a resistência do solo contaminado.
- d) Entre os fertilizantes não-nitrogenados, a contaminação com o 00-25-25 causou maior redução da resistência do solo estabilizado que o 00-20-20, sugerindo novamente que teores mais elevados de fósforo e potássio causam maiores reduções de resistência.
- e) Enquanto que a contaminação com fertilizantes não nitrogenados causou maior perda de RCS aos 28 dias de cura (redução de 200 a 220kPa), depois mantendo a diferença constante em relação ao solo não contaminado; a contaminação com fertilizantes nitrogenados causou a maior redução (150 a 190kPa) entre 28 e 56 dias de cura, depois mantendo-se a diferença constante.

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os gráficos obtidos no ensaio de difratometria de raios-X das amostras das misturas de solo-cal contaminado com fertilizante 00-25-25 e que obteve os menores valores de resistência à compressão simples aos 112 dias de cura, tanto para cal cálcica quanto para cal dolomítica.

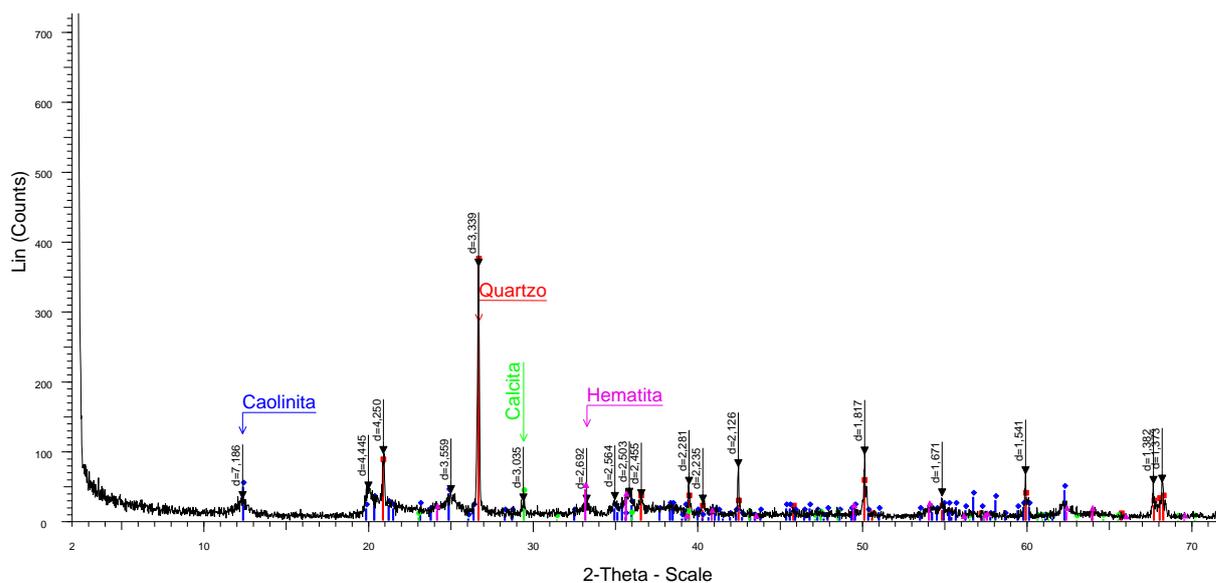


Figura 4.18 – Difractometria de raios-X da mistura solo-cal cálcica-fertilizante (00-25-25)

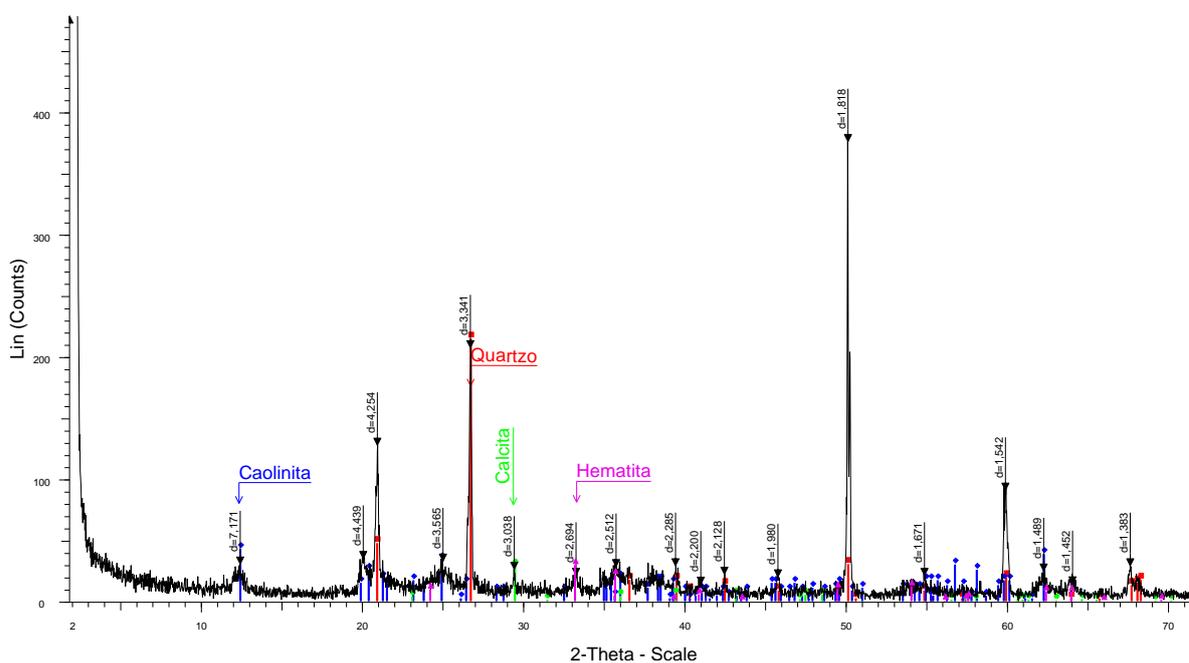


Figura 4.19 – Difractometria de raios-X da mistura solo-cal dolomítica-fertilizante (00-25-25)

De acordo com várias fontes (TEIXIERA *et al.*, 2001; PURQUERIO & CECÍLIO FILHO, 2005; SOUZA *et al.*, 2006; DICIONÁRIO LIVRE DE GEOCIÊNCIAS, 2010; SOUZA & FONTES, 2002; TRAXCO, 2009), a adição de fertilizantes químicos pode diminuir o pH do

solo, tornando-o ácido. Little (1999), Herzog & Mitchell (1963), Rogers & Glendinning (2000), Guimarães (2002) dentro outros estudiosos da estabilização de solos, afirmam que as reações de estabilização do solo com cal se iniciam quando a cal eleva o pH do solo até um valor mínimo de 12, criando-se condições alcalinas nas quais os minerais da fração argila, e até o próprio quartzo, podem reagir com a cal. Assim são formados aluminatos, silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, em números bastante significativos, todos com influência no processo de estabilização pelas suas características cimentantes.

Levantada tal conceituação, supôs-se que em um primeiro momento, que a cal adicionada agisse como agente neutralizador da acidez, processo que levaria a um retardo das reações pozolânicas no solo. Este possível fenômeno também poderia explicar os menores valores de RCS, uma vez que no processo de neutralização da acidez do solo, consome-se CaO, diminuindo sua disponibilidade para as reações conseguintes. Assim, decidiu-se avaliar a redução do pH da mistura solo-cal em função da adição de fertilizante, para isto foram usados 5 teores de fertilizante (1, 2, 3, 4 e 5%) e o teor de 4% de cal cálcica, empregado no restante do trabalho.

O foco deste procedimento foi avaliar a variação do pH de acordo com o aumento dos teores de fertilizante, evidenciando ou não o consumo de cal na desacidificação do solo da mistura, o que é representado na Figura 4.20.

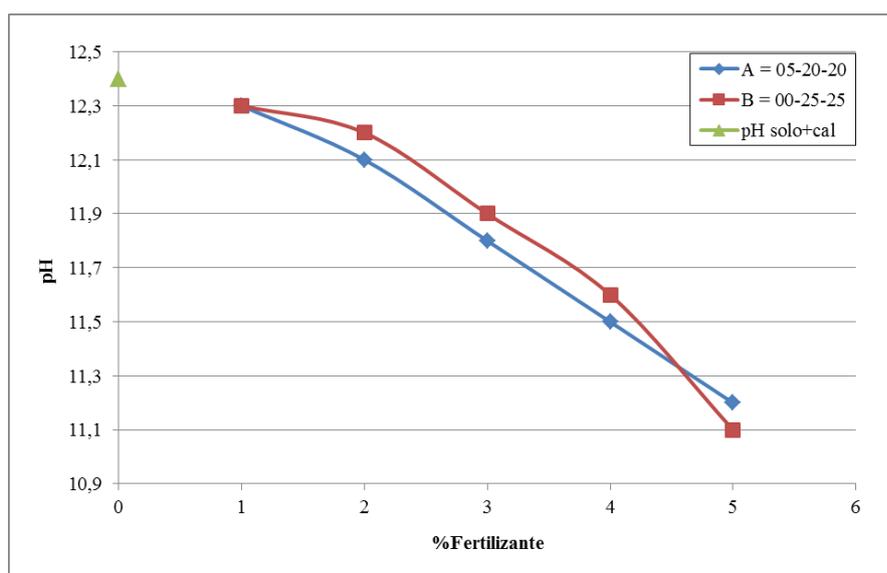


Figura 4.20 – Variação do pH em função do aumento do teor de fertilizante

A análise da Figura 4.20 favorece a hipótese do consumo de cal na desacidificação da mistura. Com o acréscimo de fertilizante, o pH da mistura solo-cal caiu de 12,4 para 12,3 logo após a misturas dos materiais. É possível que esta queda seja mais significativa à medida que o tempo de cura aumente, podendo a medição do pH a cada tempo de cura uma possível sugestão para futuras pesquisas.

Segundo Kassim (2009), em solos tropicais, o controle da acidez é um importante aspecto para a estabilização do solo com cal, uma vez que necessitam grandes teores de cal para ser usada na neutralização da acidez do solo.

De acordo com Rollings & Rollings (2003), durante a estabilização com cal, o pH é aumentado para cerca de 12. Acima de 9 a solubilidade da sílica e alumina aumentam exponencialmente, e isso libera alumina quimicamente ativa dos argilo-minerais do solo. Esta alumina agora está livre para participar das reações pozolânicas de estabilização.

#### 4.2.3.1 Efeito da formação de nitratos

Como pôde-se observar nas figuras 4.16 e 4.17, a contaminação de fertilizantes nitrogenados causaram menores reduções de RCS que com não-nitrogenados. Este fato não implica que não houve a formação de nitratos, compostos nocivos à estabilização, é possível que a interação química do solo com o fertilizante libere mais ou menos nitratos.

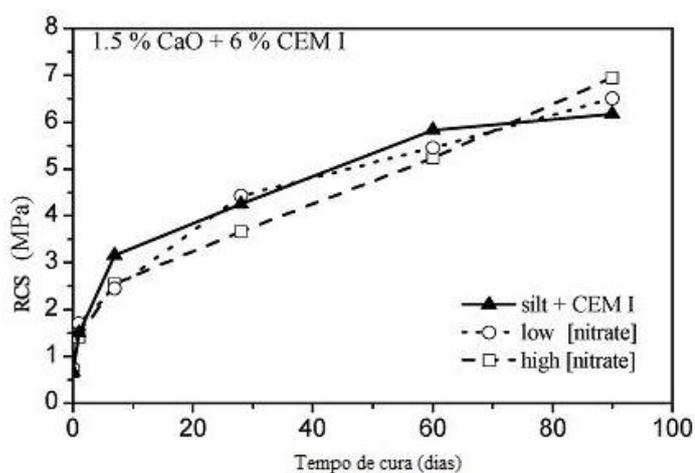


Figura 4.21 – RCS solo siltoso + nitratos + cimento (Adaptado de: Borgne *et al.*, 2008)

Os resultados desta pesquisa podem ser comparados com os obtidos por Borgne *et al.* (2008), que concluíram que os nitratos diminuem a eficiência da estabilização de solos, sendo que quanto maior sua concentração, menor a RCS alcançada, mas a tendência se inverte para tempos de cura mais prolongados (90 dias). A Figura 4.21 apresenta os resultados dos estudos dos autores com solos siltosos franceses estabilizados com cimento.

#### 4.2.3.2 Efeito da formação de fosfatos

A composição dos fertilizantes químicos de origem mineral apresenta elementos fosfatados minerais, encontrados em jazidas, que são conhecidos por apatitas, fosforitas e cuprolitas dependendo da sua natureza. A presença de fósforo na composição dos fertilizantes também permite a formação de outros produtos fosfatados após sua aplicação no solo.

De acordo com Kassim (2009), se fosfatos estão presentes no solo, eles reagem com o alumínio, o ferro e o manganês presentes no solo formando fosfatos insolúveis, prejudiciais ao processo de estabilização. Salienta-se a presença destes elementos químicos no latossolo estudado.

Borgne *et al.* (2008) avaliaram a ação de fosfatos em solos siltosos da França com adição de cimento, de onde obtiveram como resultado a Figura 4.22 e concluíram que fosfatos diminuem a eficiência do tratamento do solo, diminuindo a RCS conforme o aumento da concentração de fosfatos. O efeito nocivo dos fosfatos parece aumentar com o tempo de cura, ao menos no caso de elevadas concentrações.

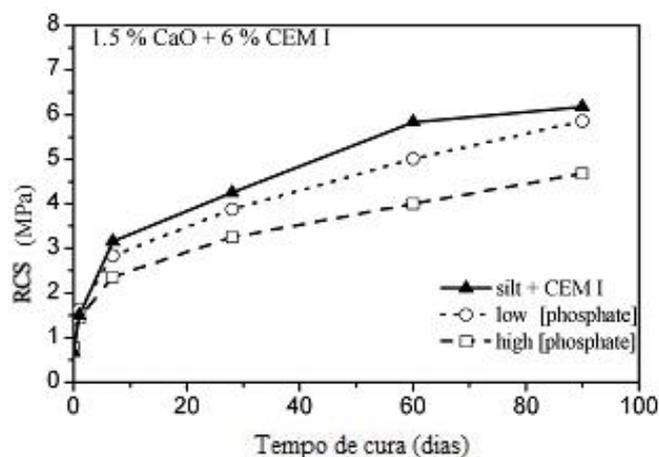


Figura 4.22 – RCS solo siltoso + fosfatos + cimento (Adaptado de: Borgne *et al.*, 2008)

Em geral, os solos que possuem grande capacidade de troca catiônica têm grande afinidade com íons de fosfatos (BRADY & WEIL, 1996). Por exemplo, dentre os silicatos, a caolinita é mais reativa com fosfatos que os demais argilo-minerais. Além disso, Demirel *et al.* (1962) mostraram que o grau de melhoria é dependente do tipo e da quantidade do argilo-mineral presente no solo.

No estudo relatado nesta dissertação, a presença de elementos fosfatados e fósforo nos fertilizantes e a presença de caolinita no solo, embasam a conclusão de que a interação entre os fosfatos e a caolinita é uma das causas da redução da RCS dos solos contaminados. A Tabela 4.4 apresenta os valores de RCS obtidos das misturas de solo-cal cálcica contaminados com os fertilizantes 00-20-20 e 00-25-25, onde pode-se visualizar melhor a influência do aumento do teor de fósforo e potássio na queda da RCS.

Tabela 4.4 – RCS da mistura solo-cal cálcica-fertilizante

Fertilizante		-	00-20-20	00-25-25
Tempo de cura (dias)	7	421,61	326,62	294,61
	14	503,89	364,33	327,62
	28	580,32	389,40	349,64
	56	707,28	438,50	363,15
	112	685,19	449,06	420,81
	140	706,25	473,26	458,17

### 4.3 COMPARAÇÃO COM OUTRO LATOSSOLO DA MESMA REGIÃO

Este trabalho concentrou-se no estudo de um solo laterítico da região de Cruz Alta, classificado pedologicamente como Latossolo Vermelho Aluminoférrico Típico, de formação residual de basalto pertencente à Formação Serra Geral, em uma provável área de contato com o arenito da Formação Tupanciretã. Com intuito de comparação e comprovação dos resultados observados para este solo, aplicou-se a mesma metodologia para um segundo solo, coletado em uma área de empréstimo nas margens da BR – 285, próximo ao Km 417 em Panambi/RS. O material foi caracterizado como argiloso, de coloração vermelha, retirado de um corte de aproximadamente 2 m de altura, com um perfil com horizonte B latossólico e

classificado pedologicamente como de Latossolo Vermelho Distrófico Típico. A Figura XX apresenta um corte característico deste tipo de latossolo.

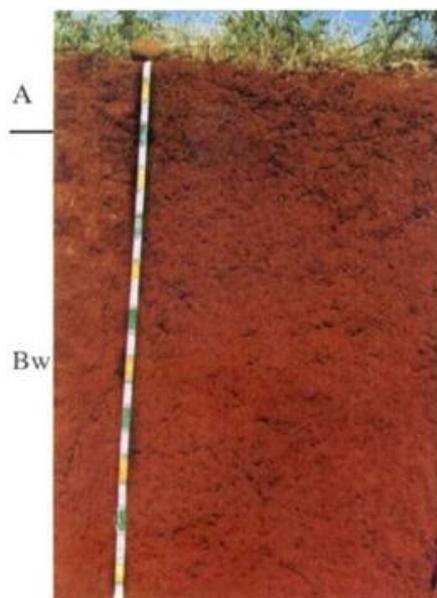


Figura 4.23 – Perfil típico de latossolo vermelho da região de Cruz Alta/RS (Fonte: Streck et al., 2002)

Este segundo solo é composto por 68% de argila, 24% de silte e 8% de areia, sendo 4% de areia fina, 3% de areia média e 1% de areia grossa. A massa específica real dos grãos obtida foi de 2,875 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados dos Limites de Atterberg são os seguintes:

Limite de Liquidez (LL): 66

Limite de Plasticidade (LP): 46

Índice de Plasticidade: 20

Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS - Unified Soil Classification System), este solo é dado como CH – argila muito plástica. De acordo com o método de classificação da AASHTO, este solo é dado como A-7-5 (IG = 20).

Para este segundo solo adicionou-se 4% de cal dolomítica e 1% de cada um dos 4 fertilizantes empregados ao longo do trabalho. Aplicaram-se os dois métodos de cura, dentro e em câmara sem controle de umidade e os mesmos métodos de moldagem e controle de aleatoriedade na moldagem.

A Figura 4.24 apresenta de forma resumida os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo natural, misturas de solo contaminadas com fertilizantes e cal dolomítica e solo-cal dolomítica.

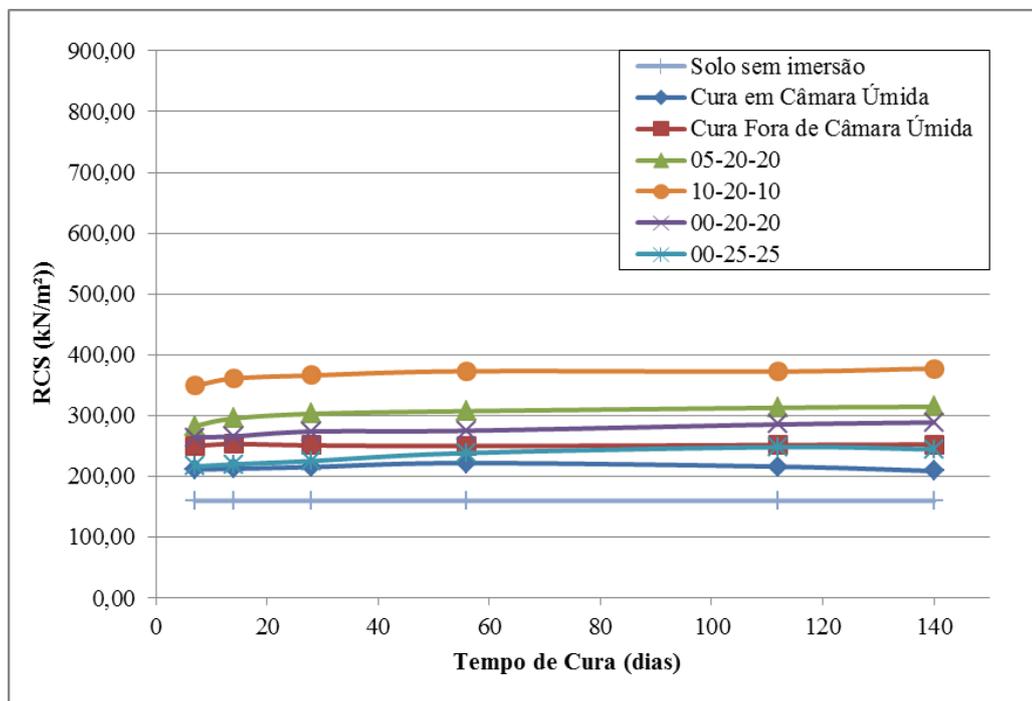


Figura 4.24 – RCS obtidas no estudo do segundo solo

Como se pode observar na Figura 4.23, nem todas as tendências observadas no primeiro solo são confirmadas para o segundo. A única semelhança aparente é a de que os aumentos de resistência foram baixíssimos ou praticamente nulos com a adição da cal dolomítica estudada; porém as maiores resistências foram observadas em misturas solo-cal contaminadas com fertilizantes nitrogenados e os corpos curados em câmara úmida tiveram os menores valores de RCS dentre todas as misturas, pouco maiores que do solo natural.

Observando as diferenças encontradas nos resultados dos dois solos, fica claro que as conclusões citadas para o latossolo de Cruz Alta não se aplicam a este latossolo de Panambi, e conseqüentemente, é provável que não se apliquem a vários outros tipos de latossolos, devido, dentre outros fatores, à variação da composição química dos mesmos, do argilo-mineral predominante, da formação pedológica dos solos e das propriedades químicas do solo, principalmente a CTC. Isto abre um novo campo de pesquisa porque o emprego de classificação pedológica é crescente nas atividades geotécnicas (principalmente em

pavimentação) e constata-se que as interações solo-cal são muito diferentes para solos classificados em um mesmo grupo, no caso os latossolos.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de laboratório apresentados e analisados nos capítulos anteriores permitiram, dentro das condições e limites específicos deste estudo, levaram às seguintes conclusões:

- Todos os fertilizantes que contaminaram o latossolo estabilizado com cal causaram redução do ganho de RCS em comparação às misturas em solo não contaminado. Após 140 dias de cura em câmara úmida a RCS do solo não contaminado estabilizado com cal atingiu 706kPa; enquanto que a resistência dos corpos-de-prova contaminados e cal variou de 458 a 558kPa.
- Os fertilizantes não-nitrogenados causaram maiores perdas de resistência que os nitrogenados. Por exemplo, o solo contaminado com fertilizante 00-20-20 (N-P-K) estabilizado com 4% de cal cálcica atingiu RCS de 473kPa aos 140 dias de cura, enquanto que o solo contaminado com fertilizante 05-20-20 estabilizado com o mesmo tipo e teor de cal e após o mesmo tempo de cura alcançou RCS de aproximadamente 559kPa ( $\approx 18\%$  maior).
- Entre os fertilizantes nitrogenados, o 05-20-20 causou menor perda de RCS que o 10-20-10, sugerindo que o teor de potássio também pode afetar a resistência do solo contaminado.
- Entre os fertilizantes não-nitrogenados, a contaminação com o 00-25-25 causou maior redução da resistência do solo estabilizado que o 00-20-20, sugerindo novamente que teores mais elevados de fósforo e potássio causam maiores reduções de resistência.

- Enquanto que a contaminação com fertilizantes não nitrogenados causou maior perda de RCS aos 28 dias de cura (redução de 200 a 220kPa), depois mantendo a diferença constante em relação ao solo não contaminado; a contaminação com fertilizantes nitrogenados causou a maior redução (150 a 190kPa) entre 28 e 56 dias de cura, depois mantendo-se a diferença constante.
- Os ensaios de resistência à compressão simples atestaram que a estabilização deste solo é mais eficiente se empregada a cal cálcica ao invés da cal dolomítica.
- A evolução da RCS com o tempo de cura das misturas com cal cálcica permitiu concluir que o pico do ganho de resistência aconteceu aos 56 dias de cura. Pode-se concluir que as reações pozolânicas cessaram após os 56 dias de cura com cal cálcica, não tendo variações significativas de resistência para maiores tempos de cura.
- As misturas com cal dolomítica não apresentaram ganhos significativos de resistência (RCS), menos de 9% de ganho aos 112 dias de cura, quando pode-se dizer que as reações pozolânicas cessaram.
- De modo geral, pode-se concluir que o solo tem maior reatividade à cal cálcica que à cal dolomítica, visto que os ganhos de resistência da segunda foram da ordem de 50% menores que da primeira.
- Os ensaios de difratometria de raios-X das misturas de solo-cal cálcica e cal dolomítica de amostras retiradas de corpos-de-prova curados por 112 dias mostraram a formação de calcita, sendo mais provável que este material formado seja um produto cimentante originado das reações do solo com a cal, possivelmente um silicato hidratado de cálcio (C-S-H).
- Solos de um mesmo grupo podem apresentar interações solo-cal muito distintas.

- A mensuração do pH em função da quantidade de fertilizante, mostrou que o aumento da quantidade deste, implica na redução do pH logo após a mistura dos materiais. O pH fator de muita importância para o início das reações pozolânicas que garantem o aumento da resistência do solo estabilizado.
- Quanto ao tipo de cura (em câmara úmida ou em câmara sem controle de umidade), não se observaram variações consideráveis na RCS, tanto para cal cálcica quanto dolomítica, sendo então este um fator de pouca influência sobre a RCS.
- O estudo da variação do grau de saturação, adotado para complementar o estudo do tipo de cura, também mostrou não ter influência sobre a RCS. Apesar da perda ou ganho de peso – de acordo com o tipo de cura, o grau de saturação manteve valores próximos em todos os momentos de aferição.
- A adição de cal ao solo reduziu o peso específico aparente seco máximo e aumentou a umidade ótima de compactação. As misturas com cal cálcica apresentaram valores de  $\gamma_{d_{máx}}$  ligeiramente menores que os correspondentes às misturas com cal dolomítica.
- O solo estudado (latossolo vermelho aluminoférrico típico da região de Cruz Alta/RS) é predominantemente caulínítico. As frações areia e silte são compostas principalmente por quartzo.
- O solo estudado, com 48% de argila, é classificado como CL – argila pouco plástica arenosa (USCS) e A-6 pelo método da AASHTO. Apresenta índice de atividade de Skempton (1953) igual a 0,30, o que o classifica como inativo.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de complementar os resultados obtidos nesta pesquisa, dar prosseguimento ao trabalho realizado nesta dissertação e ampliar o conhecimento sobre o comportamento de latossolos estabilizados, o autor sugere os seguintes tópicos de pesquisa:

- Empregar metodologias semelhantes para outros latossolos, expandindo o conhecimento deste grupo de solo em relação a estabilização com cal.
- Investigar detalhadamente o efeito da presença de compostos fosfatados no solo nas reações pozolânicas. Sugere-se também a realização de ensaios de expansão em misturas solo-cal com de compostos sulfatados.
- Estudar, de forma independente, a influência de sulfatos, fosfatos e nitratos ao processo de estabilização de solos.
- Estudar a provável influência do potássio contido nos fertilizantes químicos sobre o processo de estabilização de solos.
- Realizar ensaios de análise química total do solo, verificando a formação de novos e quais compostos sulfatados, nitratos e fosfatos durante os períodos de cura das misturas contaminadas com fertilizantes.
- Mensurar o pH de amostras retiradas dos corpos-de-prova em cada tempo de cura, definindo se este é um fator significativo não apenas logo após a mistura.
- Estudar o desenvolvimento das principais reações da cal com o solo, utilizando cales mais puras (maiores teores de CaO).
- Estudar a viabilidade de utilização de outros tipos de cales (subprodutos da indústria) de custo reduzido, na estabilização de solos.
- Desenvolver procedimentos laboratoriais normalizados para solos estabilizados com cal, visando a criação de normas técnicas específicas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRO-LINK. **Fertilizantes.** Disponível em: <http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/FormulacaodeAdubos.aspx>. Acessado em 15/08/2010.

ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSCHI, A. O. **Um Método Simples de Caracterização de Argilo-Minerais por Difração de Raios-x.** In: 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2001, Florianópolis/SC.

ALCÂNTARA, M. A. M.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; COSTA, L. M. Considerações sobre o uso de aditivos químicos em regiões tropicais. In: 29ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1995. **Anais...** v.2, p.100-110.

ALVES, M. E. **Atributos Mineralógicos e Eletroquímicos, Adsorção e Dessorção de Sulfato em Solos Paulistas.** Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 5102: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures.** Philadelphia, 1996.

ARAÚJO, A. F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará.** Dissertação de Mestrado (Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Solo – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – determinação do limite de liquidez.** 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6473: Cal virgem e hidratada. Análise química.** 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Solo – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da Massa específica.** 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos.** 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica.** 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** 1986.

ATTOH-OKINE, N. O. **Lime Treatment of Laterite Soils and Gravels – revisited.** Construction and Building Material, v.9, n.5, p.283-287. 1995.

AZAMBUJA, R. M. B. **Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas de Solo-Cimento-Bentonita para Aplicação em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2004.

AZEVEDO, A. L. C.; JÚNIOR, A. O.; PEDROSA, R. A. A.; RAMALHO, R. W. **Estabilização de Solos com Adição de Cal.** Revista Vias Gerais, Publicação do Centro de Transferência de Tecnologia do PIH/IPC – DER/MG, Minas Gerais, n. 2, p. 47-56. 1998.

BAPTISTA, C. F. N. (1976) **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis.** Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, RS.

BÉNARD, P.; GARRAULT, S.; NONAT, A.; CAU DIT COUMES, C. **Influence of orthophosphate ions on the dissolution of tricalcium silicate : parallel with the hydratation of cement pastes in similar conditions.** Cement and Concrete Research 38, 1137 – 1141. 2008.

BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I.; TODRES, H. A. **Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime – A Critical Review of Literature.** PCA R&D Serial N°2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 60p., 2003.

BISWAS, B. R.; **Study of Accelerated Curing and Other Factors Influencing Soil Stabilization.** A dissertation submitted to the Graduate College of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirement of the degree of Doctor of Philosophy, 1972.

BORGNE, T. Le; COISINIER, O.; DENELEE, D. **Effects of potential deleterious chemical compounds on soil stabilization.** Advances in Transportation Geotechnics, Taylor & Francis Group, London, 2008.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils.** (11<sup>th</sup> edition). New Jersey: Prentice Hall. 1996.

CAMPELLO, C. S.; MOURÃO, P. V.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; REZENDE, L. R. **Estabilização com Cal da Mistura Solo-Revestimento Asfáltico Fresado.** In: 32<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, 2000. v.1, p.164-174.

CARRARO, J. A. H. **Utilização de Resíduos Industriais na Estabilização de um Solo Residual de Arenito.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 1997.

CARVALHO, J. B. Q. **Propriedade e Comportamento de Solos Lateríticos Estabilizados com Cal.** 22<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, ABVp, Florianópolis, SC, 1:689-706. 1988.

CARVALHO, J. B. Q. **Reações que Ocorrem Quando da Estabilização com Cal de Solos Lateríticos.** 24<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, ABVp, Belém, vol.1, pp. 224-232. 1990.

CASTRO, F. J. C. de O. **Contribuição ao Conhecimento e à Determinação da Reatividade de Solos Sesquióxidos Utilizando o Hidróxido de Cálcio: Aplicação ao Processo de Geopolimerização (Estabilização).** 1995 (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CHAUVEL, A.; NOBREGA, M. T. **Comportamento dos Solos Argilosos Desenvolvidos sobre Basaltos do Brasil Meridional após Tratamento com Cal.** In: IV REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL. Boletim n° 12. São Paulo: ABCP, p. 124-172. 1980.

CHEN, J. J.; THOMAS, J. J.; TAYLOR, H. F. W.; JENNINGS, H. M. **Solubility and structure of calcium silicate hydrate.** Cement and Concrete Research 34, 1499 – 1519. 2004.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; CARRARO, J. A. H.; HEINECK, K. S. **Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v.127, n.9, p.774-782, 2001.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga – Portugal, 2001.

CUISINIER, O.; LE BORGNE, T.; DENELEE, D.; MASROURI, F. **Quantification of the effects of nitrates, phosphates and chlorides on soil stabilization with lime and cement.** Engineering Geology. 2010.

CUNHA, J. P.; **Desenvolvimento de um novo material a partir da composição dos resíduos da mineração de varvito e da produção de cal.** Dissertação de Mestrado (Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2007.

DEMIREL, T.; BENN, C. H.; DAVIDSON, D. T. **Use of phosphoric acid in soil stabilization.** Highway Research Board Bulletin. 282: 38-58. 1962.

DIAS, R. D. **Geomecânica dos Solos Lateríticos do Sul do Brasil.** In: II Colóquio de Solos Tropicais e Subtropicais e Suas Aplicações em Engenharia Civil, Porto Alegre. Anais... 1989. p.96-120.

DIAS, C. R. C. **Estudo de Misturas de Areia-Asfalto e Cinza Cal Para Emprego em Pavimentos Urbanos.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2004.

DICIONÁRIO LIVRE DE GEOCIÊNCIAS. **Calagem.** Disponível em: <<http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Calagem>>. Acessado em 21/03/2011.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPS). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília: EMBRAPA – SPI, 1999. 412p.

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2005.

GEHLING, W. Y. Y; ROISENBERG, A.; DIAS, R. D. **Contribuição ao estudo de solos residuais do Planalto Meridional no Rio Grande do Sul.** In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, 1981, Rio de Janeiro. Anais... p.146-164.

GODOY, H.; NOGAMI, J. S.; BERNUCCI, L.; MOURA, E. **O Uso de Mapas Pedológicos e do Método das Pastilhas MCT para o Aproveitamento de Solos Lateríticos em Obras Viárias.** In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 1998, Brasília. Anais... v.1.

GONDIM, L. M. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará.** Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2008.

GUIMARÃES, J. E. P. **Estabilização de solos – Nova e importante aplicação da cal – Seus conceitos e suas vantagens.** Boletim nº1. São Paulo: ABPC, 1971.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2002.

HARRIS, J. P.; SEBESTA, S.; SCULLION, T. **Hydrated lime stabilization of sulfate-bearing vertisols in Texas**. Transportation Research Record 1868, 31 – 39. 2004.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Lime-soil Mixtures**. Highway Research Board Bulletin, Washington, D.C., v.304, p.99-121, 1961.

HERZOG, A.; MITCHELL, J. **Reactions accompanying the stabilization of clay with cement**. 42<sup>nd</sup> Annual Meeting of the HRB. Washington, USA. 1963.

HILL, R.; DAUGHERTY, K. **The interaction of calcium nitrate and a class C fly ash during hydration**. Cement and Concrete Research 26, 1131 – 1143. 1996.

HOLT, C. C.; FREER-HEWISH, R. J. **The use of lime-treated British clays in pavement construction. Part 1: The effect of mellowing on the modification process**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport, v.129, p.228-239. 1998.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Earth construction: a comprehensive guide**. Intermediate Technology Publications, London, 1994. 362 p.

HUNTER, D. **Lime-Induced Heave in Sulfate-Bearing Clay Soils**. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, v.114, n.2, p.150-167, New York, 1988.

INTERNATIONAL FOCUS GROUP ON RURAL ROAD ENGINEERING (IFG); **Cement and Lime Stabilization**. Information Note. 2005. Disponível em <[http://www.ifgworld.org/browse/all\\_pdf\\_files.asp](http://www.ifgworld.org/browse/all_pdf_files.asp)>. Acessado em 20/09/2010.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Sidney: Butterworths, 374p. 1972.

JUSTNESS, H.; NYGAARD, E. C. **Technical calcium nitrate as set accelerator for cement at low temperatures**. Cement and Concrete Research 25, 1766 – 1774. 1995.

KASSIM, K. A. bin. **The Nanostructure Study on the Mechanism of Lime Stabilised Soil**. Universiti Teknologi Malaysia. 2009.

KÉZDI, Á. **Stabilizes Earth Roads**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1979. 327p.

KLAMT, E. **Relevância da Pedologia na Avaliação do Comportamento de Solos.** In: II Colóquio de Solos Tropicais e Subtropicais e Suas Aplicações em Engenharia Civil, 1989, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1989. p.13-24.

LAMBE, T. W. **The improvement of soil properties with dispersants.** Boston Society of Civil Engineers 41, 184 – 207. 1956.

LARNACH, W. J. **Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soil-cement Mixtures.** Civil Engineering and Public Works Reviews. London: Lomax Erskine and Co., vol.55, n.648, p.903-905, 1960.

LCPC-SETRA. **Soil treatment with lime and/or hydraulic binders – applications to the construction of fills and capping layers.** Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, França. ISBN: 2-7208-0353-7. 222p. 2000.

LITTLE, D. N. **Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime,** Published by Kendall/Hunt Publishing Company. 1995.

LITTLE, D. N. **Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates.** Volume 1: Summary of Findings. Prepared for The National Lime Association, 1999.

LOPES JUNIOR, L. da S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2007.

LOVATO, RODRIGO S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2004.

LUCENA, A. L. P.; BRUGNARA, C. M. **Estabilização de Sub-bases e Subleitos com Emprego de Cal.** In: XI Reunião Anual de Pavimentação, 1970, Campinas. Anais...

LYONS, J. W.; MAC EWAN, G. J. **Phosphoric acid in soil stabilization; effect on engineering properties of soils.** Highway Research Records 318, 4 – 14. 1962.

MALLELA, J.; QUINTUS, P. E. H. V.; SMITH, K. L. **Consideration of Lime-Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design.** Prepared for The National Lime Association, 2004.

MARANGON, M.; MOTTA, L. M. G. **Considerações sobre a Utilização da Pedologia na Engenharia Geotécnica a partir de um Sistema de Classificação dos Solos.** In: 33ª Reunião Anual de Pavimentação, 2001, Florianópolis. Anais...

MARQUES, G. L. O. **Notas de Aula – Pavimentação.** UFJF – Faculdade de Engenharia. Juiz de Fora, 2004.

MARTINS, K. P.; DIAS, R. D.; SANTOS, G. T. **Geoprocessamento e Mapeamento Geotécnico dos Latossolos do Rio Grande do Sul.** In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário (COBRAC), 2000, Florianópolis. Anais.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão Pedológica (DNPEA). **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul.** Boletim Técnico nº30. Recife, 1973. 431 p.

MITCHELL, J. K.; DERMATAS, D. **Clay Soil Heave Caused by Lime-Sulfate Reactions.** American Society of Testing Materials in Innovations and Users of Lime, San Francisco, 1990.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior.** USA: John Willey & Sons, 1976.

MITCHELL, J. K.; **Practical Problems from Surprising Soils Behaviour.** Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, v.112, n.3, p.259-289, New York, 1986.

MOHAN, D.; RAI. **Deterioration of concrete in fertilizer factories.** Durability of Building Material and Components, ASTM Special Technical Publication 691, 388 – 396. 1978.

MOTTA, L. M. G.; MEDINA, J. **Notas de aula – Geotecnia Rodoviária.** UFRJ – Escola de Engenharia. Rio de Janeiro.

NLA – NATIONAL LIME ASSOCIATION, **Technical Memorandum – Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfates.** Disponível em <[http://www.lime.org/documents/publications/free\\_downloads/technical-memorandum.pdf](http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/technical-memorandum.pdf)>. Acessado em 21/01/2011.

NÓBREGA, M. T. **Estabilização Solo-Cal.** Associação Brasileira dos Produtores de Cal. Boletim 13. São Paulo, Brasil, 1981.

NÓBREGA, M. T. **V Reunião Aberta da Indústria da Cal.** O uso da cal na engenharia civil: anais. São Paulo: Escola Politécnica da USP. 174p. 1985.

**NÓBREGA, M. T. A Estabilização de Solos Tropicais com Adição de Cal para Fins Rodoviários.** Dissertação de Mestrado em Geociências, USP, São Paulo, SP, 115 p. 1988.

**NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Os solos Tropicais Lateríticos e Saprolíticos e a Pavimentação.** In: 18ª Reunião Anual de Pavimentação, 1983, Porto Alegre. **Anais...** p. 463-484.

**NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos.** São Paulo: Vilibor, 1995.

**NÚÑEZ, W. P. Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre. 1991.

**OLIVEIRA, J.B. Pedologia aplicada.** Jaboticabal, FUNEP, 2001. 414p.

**ORMSBY, W. C.; KINTER, E. B. Effects of Dolomitic and Calcitic Limes on Streght Development in Mixtures with Two Clay Minerals.** Public Roads. V.37, n.4, p.149-160. 1973.

**OSINUBI, K. J. Influence of compactive efforts and compaction delays on lime-treated soil.** **Journal of Transportation Engineering.** Março/Abril. 1998.

**PETRY, T. M.; LITTLE, D. N. Update on Sulfate-Induced Heave in Treated Clays; Problematic Sulfate Levels.** Transportation Research Record, n.1362, p.51-55, Washington, D.C., 1992.

**PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

**PINTO, C. S. V Reunião Aberta da Indústria da Cal.** Estabilização de pavimentos com cal: anais. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1985. 174p.

**PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils.** Transportation Research Record, Washington D.C., n° 1652, p.215-227. 1999.

**PURQUERIO, L. F. V.; CECÍLIO FILHO, A. B. Concentração de nitrogênio na solução nutritiva e numero de frutos sobre a qualidade de frutos de melão.** Horticultura Brasileira, Brasília, v.2, n.3, p.831-836, 2005.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. **A presença de componentes amorfos nos solos lateríticos.** In: 18ª Reunião Anual de Pavimentação, 1983, Porto Alegre. p.407-415.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. **Propriedades e Comportamento de Solos Lateríticos Estabilizados com Cal.** In: 22ª Reunião Anual de Pavimentação, 1988, Florianópolis. v.1, p.690-706.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. **Soil properties affecting the lime stabilization of red tropical soils from North East Brazil.** 1979. 344p. These (Doctorate) – University of Leeds, Leeds, England.

ROLLINGS, R. S.; M. P. ROLLINGS. **Sulfate Attack on Bound Bases.** Washington: TRB, 2003. 14p

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. **Lime Requirement of Stabilization.** In: Transportation Research Record. 79<sup>th</sup> Annual Meeting, 2000, Washington, D.C.

SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. **Solos em Pedologia.** In: **Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.** Geologia de Engenharia. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 1998. cap.6, p.87-99.

SANTOS, J. **Estabilização de uma Argila Laterítica do Distrito Federal para Uso em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego.** Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

SANTOS, P. S.; **Ciência e Tecnologia de Argilas.** Vol 1. São Paulo: Ed. Edgar Blücher, 1989.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** Volume II. 1ª Edição. Editora Pini. São Paulo. 2001.

SHERWOOD, P. **Soil Stabilization With Cement and Lime – State of the Art Review.** Transportation Research Laboratory, HMSO, London, 1995.

SHERWOOD, P. T. **Effects of sulfate on cement and lime-stabilized soil.** Highway Research Record 353, 98 – 107, 1962.

SHI, C.; DAY, R. L. **Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators part I. Reaction kinetics.** Cement and Concrete Research 30, 51 – 58. 2000.

SILVA, C. R.; SOUZA, Z. M. **Eficiência do uso de nutrientes em solos ácidos: Manejo de nutrientes e uso pelas plantas.** Faculdade de engenharia de Ilha Solteira – UNESP. Departamento de fitossanidade, engenharia rural e solos. Área de hidráulica e irrigação. 1998. Disponível em <<http://www.agr.feis.unesp.br/acido.htm>>. Acessado em 21/03/2011.

SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. **Delay in compaction and importance of the lime fixation point on the strength and compaction characteristics of soil.** Ground Improvement, n.2, p.27-32. 1998.

SKEMPTON, A. W. **The colloidal activity of clays.** Proceedings 3<sup>rd</sup> International Conference on soil mechanic and foundation engineering. Zürich. V.1. p.57-61. 1953.

SOKOLOVITCH, V. E. **Acids as chemical stabilizers of clay soil.** Soil Mechanics and Foundation Engineering 10, 271 – 273. 1973.

SOUZA, R. B. de; FONTES, R. R. **Avaliação e correção das fertilidades dos solos para hortaliças.** 42º Congresso Brasileiro de Olericultura, Uberlândia – MG, 2002.

SOUZA, T. R.; QUAGGIO, J. A.; SILVA, G. O. **Dinâmica de íons e acidificação do solo nos sistemas de fertirrigação e adubação sólida na citricultura.** Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v.28, n.3, p.501-505, 2006.

STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Emater/RS – UFRGS, 2002.

TEIXEIRA, L. A. J.; NATALE, W.; RUGGIERO, C. **Alterações em alguns atributos químicos do solo decorrentes da irrigação e adubação nitrogenada e potássica em bananeira após dois ciclos de cultivo.** Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v.23, n.3, p. 684-689, 2001.

THOMÉ, A. **Estudo do Comportamento de um Solo Mole Tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 1994.

THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Illinois Soils.** Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, v.92, p.67-92. 1966.

TOWNSEND, F. C.; MANKE, P. G.; PARCHIER, J. V. The Influence of Sesquioxides on Lateritic Soil Properties. **Highway Research Board**, Bulletin n.374, p.80-92. 1971.

TOWNSEND, F. C. Geotechnical Characteristics of Residual Soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.111, n.1, p.77-94, January. 1985.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization, reactions, properties, design and construction.** Washington: TRB, 1987. 58p. (State of the art report, 5).

TRAXCO. **Influência do pH nos sistemas de cultura.** Disponível em: <<http://www.traxco.pt/reg-a-por-aspersao/influencia-do-ph-nos-sistemas-de-cultura>> Acessado em 20/03/2011.

TREMOCOLDI, W. A. Mineralogia dos Silicatos e dos Óxidos de Ferro da Fração Argila de Solos desenvolvidos de Rochas Básicas no Estado de São Paulo. **Revista Biociências**, Universidade de Taubaté (UNITAU), Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação, v.9, n.1, I Trimestre. 2003.

UKRAINCIIK, V.; BJEGOVIC, D. **Concrete corrosion in nitrogen fertilizer plant.** Durability of building materials and components. ASTM Special Technical Publication 691, 397 – 409. 1978.

WANG, W.; ROY, A.; SEALS, R. K.; METCALF, J. B. **Stabilization of sulfate-containing soil by cementitious mixture mechanical properties.** Transportation Research Record 1837, 12 – 19. 2003.

YEOH, N. S.; OADES, J. M. **Properties of soils and clays after acid treatment. I: clay minerals.** Australian Journal of Soil Research 10, 147 – 158. 1981.

VITTI, G. C.; PROCHNOW, L. I. **Corretivos – calcário e gesso: características, métodos de recomendação e uso: Módulo 3.** In: Curso de nutrição mineral de plantas, 1996, Brasília: ABEAS,. 1996. 58p.

**APÊNDICE A – DADOS DOS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS À  
COMPRESSÃO SIMPLES**

Tabela A.1 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade					Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)			
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
L				1	100%	0%	20,8%	390,73	33,49	28,95	7,67	21,33%	0,53	391,70	391,70	0,00	0,97	10,15	10,15	10,15	10,15	4,94	4,94	4,94	4,94
				2	100%	0%	20,8%	390,73	37,80	32,45	7,55	21,49%	0,69	391,43	391,43	0,00	0,70	10,14	10,14	10,14	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
				3	100%	0%	20,8%	390,73	32,02	27,70	7,52	21,41%	0,61	391,12	391,12	0,00	0,39	10,14	10,14	10,14	10,14	4,95	4,95	4,95	4,95
				4	100%	0%	20,8%	390,73	30,98	26,89	7,67	21,28%	0,48	390,64	390,64	0,00	-0,09	10,10	10,10	10,10	10,10	4,93	4,95	4,97	4,95
				5	100%	0%	20,8%	390,73	31,70	27,37	7,45	21,74%	0,94	386,71	386,71	0,00	-4,02	10,10	10,10	10,10	10,10	4,92	4,94	4,94	4,93

Tabela A.1 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal

A (m <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>água</sub> (g)	W <sub>solo</sub> (g)	W <sub>cal</sub> (g)	Volume água (cm <sup>3</sup> )	Volume solo (cm <sup>3</sup> )	Volume Cal (cm <sup>3</sup> )	Volume Vazios (cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	194,54	2,01	29,33	1,66	68,87	322,83	0,00	68,87	11,01	0,00	183,53	16,67	94,34	37,53	320	0,597	311,5450	282,2813				L
0,00192	194,35	2,01	29,33	1,66	69,23	322,20	0,00	69,23	10,99	0,00	183,36	16,69	94,35	37,75	289	0,540	281,8204					
0,00192	195,14	2,00	29,33	1,65	68,96	322,16	0,00	68,96	10,98	0,00	184,15	16,77	94,37	37,45	269	0,503	261,5831					
0,00192	194,37	2,01	29,33	1,66	68,54	322,10	0,00	68,54	10,98	0,00	183,38	16,70	94,35	37,38	301	0,562	292,1428					
0,00191	193,06	2,00	29,33	1,65	69,05	317,66	0,00	69,05	10,83	0,00	182,23	16,83	94,39	37,89	270	0,505	264,3150					

Tabela A.2 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica de cura em câmara úmida

Solo	Cal	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade					Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
								Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio	
L	C	Cura úmida	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,97	26,76	7,75	22,15%	0,25	380,34	380,77	-0,43	1,39	10,09	10,08	10,08	10,08	4,95	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	30,50	26,33	7,54	22,19%	0,29	379,33	379,91	-0,58	0,38	10,10	10,10	10,10	10,10	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,37	26,24	7,60	22,16%	0,26	378,85	379,28	-0,43	-0,10	10,08	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,98	26,78	7,69	22,00%	0,10	380,04	380,53	-0,49	1,09	10,09	10,09	10,09	10,09	4,95	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	33,34	28,71	7,69	22,03%	0,13	378,71	379,31	-0,60	-0,24	10,05	10,06	10,07	10,06	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,61	26,48	7,74	22,04%	0,14	379,56	379,91	-0,35	0,61	10,11	10,11	10,11	10,11	4,94	4,94	4,94	4,94
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,75	26,55	7,64	22,21%	0,31	378,88	379,33	-0,45	-0,07	10,07	10,07	10,07	10,07	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,29	27,01	7,51	21,95%	0,05	377,79	378,13	-0,34	-1,16	10,09	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	31,41	27,09	7,68	22,26%	0,36	378,95	379,44	-0,49	0,00	10,09	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	35,49	30,49	7,71	21,95%	0,05	379,34	379,67	-0,33	0,39	10,08	10,90	10,09	10,36	4,94	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	33,81	29,01	7,50	22,32%	0,42	378,94	379,25	-0,31	-0,01	10,06	10,08	10,08	10,07	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	21,9%	378,95	32,79	28,25	7,71	22,10%	0,20	378,57	378,89	-0,32	-0,38	10,09	10,10	10,10	10,10	4,95	4,96	4,95	4,95
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,78	26,53	7,53	22,37%	0,47	379,58	378,63	0,95	0,63	10,07	10,08	10,09	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,51	27,20	7,71	22,11%	0,21	380,10	379,02	1,08	1,15	10,06	10,70	10,08	10,28	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	29,32	25,40	7,63	22,06%	0,16	380,15	379,26	0,89	1,20	10,09	10,08	10,08	10,08	4,95	4,94	4,94	4,94
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	33,28	28,65	7,69	22,09%	0,19	379,91	379,00	0,91	0,96	10,08	10,09	10,09	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	32,18	27,70	7,54	22,22%	0,32	381,01	379,95	1,06	2,06	10,08	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	33,15	28,53	7,52	21,99%	0,09	380,04	378,96	1,08	1,09	10,09	10,09	10,09	10,09	4,93	4,93	4,93	4,93

Tabela A.2 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica de cura em câmara úmida

A (m²)	Vol (cm³)	γ <sub>n</sub> (g/cm³)	γ <sub>s</sub> (g/cm³)	γ <sub>d</sub> (g/cm³)	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm3)	Volume solo (cm3)	Volume Cal (cm3)	Volume Vazios (cm3)	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade		Cal	Solo
															Leitura	Carga (kgf)						
0,00192	194,05	1,96	2,72	1,60	68,96	299,40	11,98	68,96	109,95	4,61	79,49	0,69	40,96	86,76	462	0,858	445,8959	421,6118	7	Cura úmida	C	L
0,00192	194,37	1,95	2,72	1,60	68,89	298,50	11,94	68,89	109,62	4,59	80,15	0,70	41,24	85,95	428	0,796	413,4263					
0,00192	193,20	1,96	2,72	1,61	68,72	298,21	11,93	68,72	109,51	4,59	79,10	0,69	40,94	86,87	418	0,777	405,5132					
0,00192	194,17	1,96	2,72	1,60	68,53	299,52	11,98	68,53	110,00	4,61	79,57	0,69	40,98	86,13	541	1,003	521,3400	503,8910	14			
0,00192	192,82	1,96	2,72	1,61	68,36	298,41	11,94	68,36	109,59	4,59	78,63	0,69	40,78	86,93	510	0,946	493,7282					
0,00192	193,77	1,96	2,72	1,61	68,54	299,05	11,96	68,54	109,83	4,60	79,35	0,69	40,95	86,38	513	0,952	496,6047					
0,00193	194,57	1,95	2,72	1,59	68,86	298,10	11,92	68,86	109,47	4,59	80,51	0,71	41,38	85,52	627	1,161	601,0381	580,3176	28			
0,00192	193,26	1,95	2,72	1,60	68,00	297,88	11,92	68,00	109,39	4,58	79,29	0,70	41,03	85,76	584	1,082	564,6837					
0,00192	193,52	1,96	2,72	1,60	68,99	298,04	11,92	68,99	109,45	4,59	79,48	0,70	41,07	86,80	595	1,103	575,2311					
0,00192	199,04	1,91	2,72	1,56	68,28	299,10	11,96	68,28	109,84	4,60	84,59	0,74	42,50	80,71	791	1,463	761,1118	707,2806	56			
0,00192	193,85	1,95	2,72	1,60	69,13	297,89	11,92	69,13	109,40	4,58	79,87	0,70	41,20	86,56	708	1,310	680,8230					
0,00193	194,56	1,95	2,72	1,59	68,53	298,12	11,92	68,53	109,48	4,59	80,50	0,71	41,37	85,13	708	1,310	679,9070					
0,00192	193,20	1,96	2,72	1,61	69,39	298,26	11,93	69,39	109,54	4,59	79,08	0,69	40,93	87,75	698	1,292	673,9936	685,1940	112			
0,00192	197,03	1,93	2,72	1,58	68,83	299,29	11,97	68,83	109,91	4,60	82,51	0,72	41,88	83,42	727	1,345	701,8005					
0,00192	193,52	1,96	2,72	1,61	68,70	299,47	11,98	68,70	109,98	4,61	78,94	0,69	40,79	87,03	705	1,305	679,7879					
0,00192	193,33	1,97	2,72	1,61	68,74	299,20	11,97	68,74	109,88	4,60	78,84	0,69	40,78	87,18	730	1,351	704,6771	706,2468				
0,00192	193,20	1,97	2,72	1,61	69,27	299,75	11,99	69,27	110,08	4,61	78,51	0,68	40,64	88,24	750	1,387	723,8542					
0,00191	192,61	1,97	2,72	1,62	68,51	299,55	11,98	68,51	110,01	4,61	77,99	0,68	40,49	87,84	712	1,318	690,2091					

Tabela A.3 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica de cura em câmara sem controle de umidade

Solo	Cal	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade					Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
								Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio	
L	C	Cura seca	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	37,64	32,24	7,64	21,95%	0,05	378,28	379,25	-0,97	-0,67	10,10	10,10	10,10	10,10	4,95	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	34,36	29,50	7,72	22,31%	0,41	378,04	378,83	-0,79	-0,91	10,10	10,09	10,09	10,09	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	21,9%	378,95	35,29	30,25	7,62	22,27%	0,37	378,76	379,74	-0,98	-0,19	10,09	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	35,69	30,60	7,70	22,23%	0,33	376,65	378,09	-1,44	-2,30	10,09	10,09	10,09	10,09	4,94	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	36,25	31,09	7,69	22,05%	0,15	377,39	378,91	-1,52	-1,56	10,08	10,10	10,10	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	35,73	30,65	7,69	22,13%	0,23	377,37	379,24	-1,87	-1,58	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	36,91	31,56	7,68	22,40%	0,50	376,41	378,71	-2,30	-2,54	10,09	10,09	10,09	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	38,36	32,75	7,60	22,31%	0,41	377,45	379,59	-2,14	-1,50	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	37,23	31,87	7,74	22,21%	0,31	377,89	380,05	-2,16	-1,06	10,09	10,09	10,09	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	33,72	28,92	7,50	22,41%	0,51	373,63	377,99	-4,36	-5,32	10,05	10,05	10,05	10,05	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	21,9%	378,95	33,70	28,92	7,63	22,45%	0,55	375,66	378,95	-3,29	-3,29	10,09	10,09	10,09	10,09	4,97	4,96	4,96	4,96
				C	100%	4%	21,9%	378,95	38,41	32,86	7,59	21,96%	0,06	374,35	378,52	-4,17	-4,60	10,06	10,07	10,07	10,07	4,96	4,96	4,96	4,96
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,62	26,36	7,62	22,73%	0,83	372,14	379,83	-7,69	-6,81	10,08	10,08	10,09	10,08	4,93	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	30,75	26,57	7,73	22,19%	0,29	372,63	379,04	-6,41	-6,32	10,09	10,09	10,09	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	31,93	27,58	7,73	21,91%	0,01	371,46	378,72	-7,26	-7,49	10,09	10,09	10,09	10,09	4,95	4,96	4,96	4,96
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,77	26,49	7,53	22,57%	0,67	370,55	378,80	-8,25	-8,40	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,93	4,93	4,93
				B	100%	4%	21,9%	378,95	36,86	31,56	7,70	22,21%	0,31	370,64	378,47	-7,83	-8,31	10,05	10,06	10,06	10,06	4,93	4,93	4,93	4,93
				C	100%	4%	21,9%	378,95	31,08	26,90	7,84	21,93%	0,03	369,66	379,20	-9,54	-9,29	10,08	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94

Tabela A.3 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cálcica de cura em câmara sem controle de umidade

A (m²)	Vol (cm³)	γn (g/cm³)	γs (g/cm³)	γd (g/cm³)	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm3)	Volume solo (cm3)	Volume Cal (cm3)	Volume Vazios (cm3)	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade		Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	194,37	1,95	2,72	1,60	68,09	298,26	11,93	68,09	109,53	4,59	80,24	0,70	41,29	84,85	422	0,785	407,6963	443,6913	7	Cura seca	C	L
0,00192	194,24	1,95	2,72	1,59	68,97	297,19	11,89	68,97	109,14	4,57	80,53	0,71	41,46	85,64	448	0,832	432,5260					
0,00192	193,52	1,96	2,72	1,60	68,99	297,86	11,91	68,99	109,39	4,58	79,55	0,70	41,11	86,72	507	0,941	490,8516	531,8779	14			
0,00192	193,91	1,94	2,72	1,59	68,49	296,30	11,85	68,49	108,82	4,56	80,54	0,71	41,53	85,04	604	1,119	582,2882					
0,00192	193,45	1,95	2,72	1,60	68,18	297,31	11,89	68,18	109,19	4,57	79,69	0,70	41,20	85,56	522	0,968	505,2345	612,9463	28			
0,00192	193,58	1,95	2,72	1,60	68,37	297,12	11,88	68,37	109,11	4,57	79,90	0,70	41,27	85,57	525	0,974	508,1110					
0,00192	193,39	1,95	2,72	1,59	68,89	295,69	11,83	68,89	108,59	4,55	80,25	0,71	41,50	85,85	612	1,134	591,5317	762,7091	56			
0,00192	193,58	1,95	2,72	1,59	68,84	296,74	11,87	68,84	108,98	4,57	80,04	0,70	41,35	86,00	638	1,182	616,4621					
0,00192	193,39	1,95	2,72	1,60	68,68	297,31	11,89	68,68	109,19	4,57	79,63	0,70	41,18	86,25	653	1,209	630,8449	731,4644	112			
0,00193	194,19	1,92	2,72	1,57	68,40	293,49	11,74	68,40	107,78	4,52	81,89	0,73	42,17	83,53	799	1,477	764,6344					
0,00193	195,22	1,92	2,72	1,57	68,88	294,98	11,80	68,88	108,33	4,54	82,35	0,73	42,18	83,64	794	1,468	758,8584	739,5689				
0,00193	194,51	1,92	2,72	1,58	67,41	295,13	11,81	67,41	108,39	4,54	81,58	0,72	41,94	82,63	799	1,477	764,6344					
0,00191	193,00	1,93	2,72	1,57	68,93	291,55	11,66	68,93	107,07	4,49	81,45	0,73	42,20	84,63	757	1,400	731,5532	739,5689				
0,00192	193,39	1,93	2,72	1,58	67,66	293,24	11,73	67,66	107,69	4,51	81,19	0,72	41,98	83,34	748,5	1,385	722,4159					
0,00193	194,70	1,91	2,72	1,56	66,77	292,97	11,72	66,77	107,59	4,51	82,60	0,74	42,42	80,84	772,5	1,429	740,4240	739,5689				
0,00191	193,06	1,92	2,72	1,57	68,24	290,68	11,63	68,24	106,75	4,47	81,84	0,74	42,39	83,39	766	1,417	741,1951					
0,00191	191,97	1,93	2,72	1,58	67,37	291,61	11,66	67,37	107,09	4,49	80,39	0,72	41,88	83,79	754	1,395	730,6447	739,5689				
0,00192	193,20	1,91	2,72	1,57	66,49	291,51	11,66	66,49	107,06	4,48	81,66	0,73	42,27	81,42	774	1,431	746,8668					

Tabela A.4 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica contaminados com fertilizante 05-20-20

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
L	C	A1	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,24	26,14	7,74	22,28%	0,38	380,46	381,07	-0,61	1,51	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	33,19	28,55	7,60	22,15%	0,25	378,04	378,54	-0,50	-0,91	10,08	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	29,64	25,69	7,66	21,91%	0,01	378,99	379,54	-0,55	0,04	10,06	10,07	10,08	10,07	4,94	4,93	4,93	4,93
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	28,22	24,52	7,66	21,95%	0,05	378,80	379,23	-0,43	-0,15	10,08	10,09	10,09	10,09	4,95	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,35	27,09	7,68	21,95%	0,05	379,14	379,65	-0,51	0,19	10,08	10,08	10,08	10,08	4,94	4,93	4,93	4,93
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,95	26,66	7,60	22,51%	0,61	378,37	378,73	-0,36	-0,58	10,05	10,05	10,05	10,05	4,95	4,95	4,95	4,95
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	28,39	24,59	7,69	22,49%	0,59	382,16	382,87	-0,71	3,21	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	32,75	28,20	7,67	22,16%	0,26	379,08	379,32	-0,24	0,13	10,08	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	32,45	27,91	7,50	22,24%	0,34	378,16	378,52	-0,36	-0,79	10,08	10,08	10,08	10,08	4,95	4,95	4,95	4,95
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	31,80	27,37	7,61	22,42%	0,52	378,83	379,64	-0,81	-0,12	10,09	10,10	10,10	10,10	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	21,9%	378,95	29,52	25,55	7,61	22,13%	0,23	380,15	380,82	-0,67	1,20	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	29,62	25,60	7,53	22,25%	0,35	378,65	379,28	-0,63	-0,30	10,05	10,05	10,05	10,05	4,95	4,95	4,95	4,95
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	37,05	31,75	7,64	21,98%	0,08	379,62	378,71	0,91	0,67	10,07	10,06	10,06	10,06	4,95	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	32,55	28,08	7,73	21,97%	0,07	379,86	378,85	1,01	0,91	10,09	10,09	10,09	10,09	4,93	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	34,16	29,30	7,55	22,34%	0,44	380,34	379,35	0,99	1,39	10,07	10,07	10,07	10,07	4,93	4,93	4,93	4,93
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	35,92	30,80	7,50	21,97%	0,07	379,05	377,37	1,68	0,10	10,07	10,07	10,07	10,07	4,92	4,93	4,94	4,93
				B	100%	4%	21,9%	378,95	32,96	28,35	7,49	22,10%	0,20	380,60	379,42	1,18	1,65	10,09	10,09	10,09	10,09	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,88	26,67	7,74	22,24%	0,34	379,35	378,28	1,07	0,40	10,07	10,07	10,07	10,07	4,95	4,95	4,95	4,95

Tabela A.4 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cálcica contaminados com fertilizante 05-20-20

A (m <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>água</sub> (g)	W <sub>solo</sub> (g)	W <sub>cal</sub> (g)	Volume água (cm <sup>3</sup> )	Volume solo (cm <sup>3</sup> )	Volume Cal (cm <sup>3</sup> )	Volume Vazios (cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	193,58	1,97	2,72	1,61	69,33	299,17	11,97	69,33	109,87	4,60	79,11	0,69	40,87	87,63	424	0,788	411,2663	408,7536	7			
0,00192	193,20	1,96	2,72	1,60	68,55	297,59	11,90	68,55	109,29	4,58	79,33	0,70	41,06	86,40	423	0,786	410,3075					
0,00191	192,49	1,97	2,72	1,62	68,11	298,93	11,96	68,11	109,78	4,60	78,11	0,68	40,58	87,20	416	0,774	404,6870					
0,00192	194,11	1,95	2,72	1,60	68,17	298,68	11,95	68,17	109,69	4,60	79,83	0,70	41,12	85,40	463	0,860	446,8509	453,2814	14			
0,00191	192,68	1,97	2,72	1,61	68,24	298,95	11,96	68,24	109,79	4,60	78,29	0,68	40,63	87,15	468	0,869	454,6825					
0,00192	193,40	1,96	2,72	1,60	69,52	296,97	11,88	69,52	109,06	4,57	79,77	0,70	41,25	87,14	475	0,882	458,3107					
0,00192	194,10	1,97	2,72	1,61	70,15	300,00	12,00	70,15	110,17	4,62	79,32	0,69	40,86	88,45	503	0,933	485,7043	482,4310	28			
0,00192	193,20	1,96	2,72	1,61	68,77	298,37	11,93	68,77	109,57	4,59	79,03	0,69	40,91	87,02	510	0,946	493,7282					
0,00192	193,98	1,95	2,72	1,59	68,81	297,45	11,90	68,81	109,24	4,58	80,17	0,70	41,33	85,83	485	0,900	467,8606					
0,00193	195,09	1,94	2,72	1,59	69,38	297,55	11,90	69,38	109,27	4,58	81,24	0,71	41,64	85,40	528	0,979	506,8751	507,6598	56			
0,00192	193,58	1,96	2,72	1,61	68,88	299,30	11,97	68,88	109,91	4,60	79,06	0,69	40,84	87,12	531	0,985	513,8642					
0,00192	193,40	1,96	2,72	1,60	68,91	297,83	11,91	68,91	109,38	4,58	79,45	0,70	41,08	86,73	521	0,967	502,2402					
0,00192	193,66	1,96	2,72	1,61	68,41	299,24	11,97	68,41	109,89	4,60	79,16	0,69	40,88	86,42	596	1,104	573,8643	553,4010	112			
0,00191	193,13	1,97	2,72	1,61	68,41	299,47	11,98	68,41	109,98	4,61	78,54	0,69	40,67	87,10	535	0,992	518,3990					
0,00191	192,23	1,98	2,72	1,62	69,46	298,92	11,96	69,46	109,78	4,60	77,85	0,68	40,50	89,23	585	1,084	567,9396					
0,00191	192,23	1,97	2,72	1,62	68,29	298,81	11,95	68,29	109,74	4,60	77,89	0,68	40,52	87,67	582	1,079	565,0513	558,8301				
0,00192	194,17	1,96	2,72	1,61	68,89	299,72	11,99	68,89	110,07	4,61	79,49	0,69	40,94	86,66	597	1,106	574,8193					
0,00192	193,79	1,96	2,72	1,60	69,02	298,40	11,94	69,02	109,58	4,59	79,61	0,70	41,08	86,69	557	1,033	536,6198					

Tabela A.5 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica contaminados com fertilizante 00-20-20

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
L	C	B1	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,71	26,50	7,68	22,37%	0,47	378,28	379,03	-0,75	-0,67	10,04	10,05	10,05	10,05	4,95	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	21,9%	378,95	36,27	31,08	7,68	22,18%	0,28	378,57	378,80	-0,23	-0,38	10,06	10,06	10,06	10,06	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	32,15	27,68	7,65	22,32%	0,42	378,23	378,97	-0,74	-0,72	10,09	10,09	10,09	10,09	4,95	4,95	4,95	4,95
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	35,56	30,50	7,71	22,20%	0,30	379,03	379,75	-0,72	0,08	10,06	10,06	10,06	10,06	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,51	27,23	7,72	21,94%	0,04	378,22	378,58	-0,36	-0,73	10,05	10,05	10,05	10,05	4,93	4,93	4,93	4,93
				C	100%	4%	21,9%	378,95	32,11	27,64	7,64	22,35%	0,45	378,31	378,88	-0,57	-0,64	10,05	10,06	10,06	10,06	4,94	4,93	4,93	4,93
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	36,05	30,90	7,63	22,13%	0,23	377,85	378,76	-0,91	-1,10	10,06	10,06	10,06	10,06	4,95	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,21	26,91	7,65	22,33%	0,43	377,59	378,32	-0,73	-1,36	10,08	10,08	10,08	10,08	4,93	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,62	26,44	7,63	22,22%	0,32	379,69	380,14	-0,45	0,74	10,08	10,09	10,09	10,09	4,95	4,95	4,95	4,95
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	35,04	30,00	7,50	22,40%	0,50	378,03	378,75	-0,72	-0,92	10,09	10,09	10,09	10,09	4,95	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,69	27,34	7,66	22,10%	0,20	378,35	378,73	-0,38	-0,60	10,06	10,06	10,06	10,06	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,03	25,97	7,60	22,10%	0,20	379,60	380,26	-0,66	0,65	10,09	10,09	10,09	10,09	4,95	4,95	4,95	4,95
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	29,07	25,15	7,46	22,16%	0,26	381,39	380,39	1,00	2,44	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	30,26	26,06	7,62	22,78%	0,88	379,35	379,28	0,07	0,40	10,10	10,10	10,10	10,10	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,98	26,68	7,56	22,49%	0,59	381,28	380,29	0,99	2,33	10,08	10,08	10,08	10,08	4,95	4,95	4,95	4,95
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	35,68	30,62	7,84	22,21%	0,31	379,28	378,25	1,03	0,33	10,06	10,06	10,06	10,06	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	34,77	29,88	7,59	21,94%	0,04	380,91	379,82	1,09	1,96	10,07	10,07	10,07	10,07	4,93	4,93	4,93	4,93
				C	100%	4%	21,9%	378,95	34,31	29,47	7,60	22,13%	0,23	379,33	378,55	0,78	0,38	10,08	10,08	10,08	10,08	4,92	4,93	4,94	4,93

Tabela A.5 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cálcica contaminados com fertilizante 00-20-20

A (m <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm <sup>3</sup> )	Volume solo (cm <sup>3</sup> )	Volume Cal (cm <sup>3</sup> )	Volume Vazios (cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00193	193,86	1,95	2,72	1,59	69,15	297,24	11,89	69,15	109,16	4,57	80,13	0,70	41,33	86,30	369	0,687	356,1221	326,6151	7			
0,00192	192,82	1,96	2,72	1,61	68,72	297,93	11,92	68,72	109,41	4,58	78,82	0,69	40,88	87,19	315	0,588	306,7507					
0,00192	194,17	1,95	2,72	1,59	69,01	297,33	11,89	69,01	109,19	4,57	80,41	0,71	41,41	85,82	327	0,610	316,9725					
0,00193	194,38	1,95	2,72	1,60	68,87	298,24	11,93	68,87	109,52	4,59	80,27	0,70	41,29	85,80	361	0,672	348,0344	364,3320	14			
0,00191	191,84	1,97	2,72	1,62	68,04	298,25	11,93	68,04	109,53	4,59	77,73	0,68	40,52	87,54	368,5	0,686	359,5037					
0,00191	192,23	1,97	2,72	1,61	69,11	297,31	11,89	69,11	109,18	4,57	78,47	0,69	40,82	88,06	396	0,737	385,4580					
0,00193	194,12	1,95	2,72	1,59	68,47	297,48	11,90	68,47	109,25	4,58	80,29	0,71	41,36	85,27	391,5	0,729	377,5515	389,3993	28			
0,00191	192,94	1,96	2,72	1,60	68,91	296,80	11,87	68,91	109,00	4,57	79,37	0,70	41,14	86,82	381	0,709	370,5353					
0,00192	194,11	1,96	2,72	1,60	69,03	298,71	11,95	69,03	109,70	4,60	79,82	0,70	41,12	86,49	435	0,808	420,1112					
0,00192	194,17	1,95	2,72	1,59	69,18	296,97	11,88	69,18	109,06	4,57	80,55	0,71	41,48	85,89	442	0,821	426,7961	438,4974	56			
0,00192	192,82	1,96	2,72	1,61	68,49	297,94	11,92	68,49	109,42	4,58	78,81	0,69	40,88	86,90	429	0,797	416,0606					
0,00192	194,17	1,95	2,72	1,60	68,71	298,93	11,96	68,71	109,78	4,60	79,79	0,70	41,09	86,11	490	0,910	472,6356					
0,00192	193,58	1,97	2,72	1,61	69,18	300,20	12,01	69,18	110,25	4,62	78,72	0,69	40,66	87,89	476	0,884	461,1270	449,0629	112			
0,00192	194,37	1,95	2,72	1,59	70,37	297,09	11,88	70,37	109,10	4,57	80,69	0,71	41,51	87,21	438	0,814	422,9762					
0,00192	193,98	1,97	2,72	1,60	70,00	299,30	11,97	70,00	109,92	4,60	79,46	0,69	40,96	88,10	480	0,891	463,0857					
0,00192	192,82	1,97	2,72	1,61	68,94	298,41	11,94	68,94	109,59	4,59	78,64	0,69	40,78	87,66	500	0,928	484,1396	473,2554				
0,00191	192,23	1,98	2,72	1,63	68,53	300,37	12,01	68,53	110,31	4,62	77,30	0,67	40,21	88,66	485	0,900	471,6643					
0,00191	192,42	1,97	2,72	1,61	68,74	298,65	11,95	68,74	109,68	4,59	78,15	0,68	40,61	87,96	477	0,886	463,9623					

Tabela A.6 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica contaminados com fertilizante 00-25-25

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
L	C	C1	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	33,21	28,59	7,57	21,98%	0,08	379,45	380,07	-0,62	0,50	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	36,54	31,28	7,84	22,44%	0,54	377,89	378,28	-0,39	-1,06	10,07	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	35,40	30,34	7,69	22,34%	0,44	379,64	379,97	-0,33	0,69	10,06	10,06	10,06	10,06	4,94	4,94	4,94	4,94
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	34,38	29,49	7,62	22,36%	0,46	377,26	377,59	-0,33	-1,69	10,09	10,08	10,08	10,08	4,95	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	40,23	34,25	7,63	22,46%	0,56	379,03	379,55	-0,52	0,08	10,01	10,10	10,10	10,07	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	21,9%	378,95	36,40	31,17	7,75	22,33%	0,43	378,22	378,61	-0,39	-0,73	10,09	10,09	10,09	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	36,17	30,99	7,60	22,15%	0,25	378,85	378,91	-0,06	-0,10	10,08	10,08	10,08	10,08	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	21,9%	378,95	36,11	30,87	7,69	22,61%	0,71	380,62	377,99	2,63	1,67	10,09	10,08	10,08	10,08	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	21,9%	378,95	36,70	31,41	7,52	22,14%	0,24	379,38	380,65	-1,27	0,43	10,01	10,10	10,10	10,07	4,94	4,94	4,94	4,94
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	31,29	27,02	7,65	22,04%	0,14	378,09	378,09	0,00	-0,86	10,06	10,06	10,06	10,06	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	34,56	29,63	7,57	22,35%	0,45	378,38	378,65	-0,27	-0,57	10,05	10,05	10,05	10,05	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	36,78	31,48	7,66	22,25%	0,35	379,05	379,15	-0,10	0,10	10,10	10,10	10,10	10,10	4,95	4,95	4,93	4,94
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	32,17	27,72	7,56	22,07%	0,17	380,87	379,79	1,08	1,92	10,04	10,04	10,04	10,04	4,93	4,97	4,97	4,96
				B	100%	4%	21,9%	378,95	35,29	30,30	7,60	21,98%	0,08	379,89	378,72	1,17	0,94	10,07	10,08	10,09	10,08	4,93	4,93	4,93	4,93
				C	100%	4%	21,9%	378,95	35,19	30,21	7,72	22,14%	0,24	379,24	378,15	1,09	0,29	10,05	10,05	10,05	10,05	4,94	4,94	4,94	4,94
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	36,11	30,98	7,68	22,02%	0,12	381,47	380,19	1,28	2,52	10,11	10,11	10,11	10,11	4,94	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	33,31	28,70	7,72	21,97%	0,07	380,05	378,85	1,20	1,10	10,08	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	34,86	29,96	7,72	22,03%	0,13	380,82	379,68	1,14	1,87	10,09	10,08	10,08	10,08	4,95	4,95	4,95	4,95

Tabela A.6 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cálcica contaminados com fertilizante 00-25-25

A (m <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>água</sub> (g)	W <sub>solo</sub> (g)	W <sub>cal</sub> (g)	Volume água (cm <sup>3</sup> )	Volume solo (cm <sup>3</sup> )	Volume Cal (cm <sup>3</sup> )	Volume Vazios (cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	193,58	1,96	2,72	1,61	68,37	299,11	11,96	68,37	109,85	4,60	79,13	0,69	40,88	86,40	284	0,531	277,0261	294,6052	7			
0,00192	193,13	1,96	2,72	1,60	69,26	296,76	11,87	69,26	108,98	4,57	79,59	0,70	41,21	87,02	296	0,553	288,5324					
0,00192	192,82	1,97	2,72	1,61	69,32	298,38	11,94	69,32	109,58	4,59	78,65	0,69	40,79	88,15	327	0,610	318,2570					
0,00192	194,05	1,94	2,72	1,59	68,94	296,46	11,86	68,94	108,87	4,56	80,61	0,71	41,54	85,52	335	0,625	324,6124	327,6169	14			
0,00192	193,79	1,96	2,72	1,60	69,53	297,60	11,90	69,53	109,29	4,58	79,92	0,70	41,24	87,00	328	0,612	317,9274					
0,00192	193,39	1,96	2,72	1,60	69,04	297,29	11,89	69,04	109,18	4,57	79,64	0,70	41,18	86,69	350	0,652	340,3108					
0,00193	194,77	1,95	2,72	1,59	68,69	298,23	11,93	68,69	109,52	4,59	80,65	0,71	41,41	85,16	353	0,658	340,4253	349,6408	28			
0,00192	194,05	1,96	2,72	1,60	70,18	298,50	11,94	70,18	109,62	4,59	79,83	0,70	41,14	87,91	349	0,650	337,9822					
0,00192	193,01	1,97	2,72	1,61	68,78	298,66	11,95	68,78	109,68	4,59	78,73	0,69	40,79	87,35	381,5	0,710	370,5148					
0,00192	192,82	1,96	2,72	1,61	68,29	297,88	11,92	68,29	109,39	4,58	78,84	0,69	40,89	86,62	350	0,652	340,3108	363,1537	56			
0,00192	192,62	1,96	2,72	1,61	69,11	297,37	11,89	69,11	109,21	4,57	78,84	0,69	40,93	87,66	383	0,713	371,9531					
0,00192	193,84	1,96	2,72	1,60	68,99	298,14	11,93	68,99	109,49	4,59	79,77	0,70	41,15	86,49	389	0,724	377,1971					
0,00193	193,73	1,97	2,72	1,61	68,87	300,00	12,00	68,87	110,17	4,62	78,94	0,69	40,75	87,24	430	0,799	414,2198	420,8136	112			
0,00191	192,42	1,97	2,72	1,62	68,46	299,45	11,98	68,46	109,97	4,61	77,84	0,68	40,45	87,95	436	0,810	424,4895					
0,00192	192,62	1,97	2,72	1,61	68,75	298,55	11,94	68,75	109,64	4,59	78,39	0,69	40,70	87,70	437	0,812	423,7315					
0,00192	194,30	1,96	2,72	1,61	68,83	300,61	12,02	68,83	110,40	4,62	79,27	0,69	40,80	86,83	459	0,853	443,6282	458,1675				
0,00192	193,20	1,97	2,72	1,61	68,47	299,60	11,98	68,47	110,03	4,61	78,56	0,69	40,66	87,15	470	0,873	455,3738					
0,00192	194,05	1,96	2,72	1,61	68,76	300,06	12,00	68,76	110,20	4,62	79,23	0,69	40,83	86,77	493	0,915	475,5005					

Tabela A.7 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cálcica contaminados com fertilizante 10-20-10

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
L	C	D1	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	36,75	31,52	7,70	21,96%	0,06	379,76	380,30	-0,54	0,81	10,07	10,07	10,07	10,07	4,94	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	33,81	29,00	7,61	22,49%	0,59	378,28	378,85	-0,57	-0,67	10,09	10,09	10,09	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,62	26,42	7,50	22,20%	0,30	378,93	379,37	-0,44	-0,02	10,08	10,09	10,09	10,09	4,95	4,95	4,95	4,95
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	29,98	25,95	7,66	22,03%	0,13	377,63	378,06	-0,43	-1,32	10,07	10,08	10,08	10,08	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	21,9%	378,95	29,72	25,65	7,63	22,59%	0,69	377,84	378,45	-0,61	-1,11	10,06	10,06	10,06	10,06	4,96	4,95	4,96	4,96
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,98	26,76	7,68	22,12%	0,22	379,28	379,74	-0,46	0,33	10,08	10,08	10,08	10,08	4,96	4,96	4,96	4,96
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	36,83	31,48	7,68	22,48%	0,58	378,44	379,38	-0,94	-0,51	10,05	10,05	10,05	10,05	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	21,9%	378,95	30,64	26,45	7,60	22,23%	0,33	377,68	381,24	-3,56	-1,27	10,09	10,09	10,09	10,09	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	21,9%	378,95	36,45	31,21	7,66	22,25%	0,35	380,18	379,79	0,39	1,23	10,06	10,06	10,06	10,06	4,96	4,96	4,96	4,96
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	34,19	29,40	7,63	22,00%	0,10	379,31	379,71	-0,40	0,36	10,08	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	35,57	30,42	7,51	22,48%	0,58	377,65	378,22	-0,57	-1,30	10,11	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	37,99	32,37	7,51	22,61%	0,71	378,80	378,22	0,58	-0,15	10,11	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	37,64	32,20	7,67	22,18%	0,28	379,71	379,04	0,67	0,76	10,08	10,09	10,09	10,09	4,93	4,93	4,93	4,93
				B	100%	4%	21,9%	378,95	36,05	30,93	7,69	22,03%	0,13	380,16	379,44	0,72	1,21	10,08	10,09	10,09	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,14	26,03	7,69	22,41%	0,51	379,81	379,23	0,58	0,86	10,07	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	34,10	29,33	7,68	22,03%	0,13	380,71	379,97	0,74	1,76	10,09	10,10	10,10	10,10	4,95	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,22	26,95	7,64	22,11%	0,21	380,15	379,04	1,11	1,20	10,12	10,12	10,12	10,12	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	31,75	27,40	7,60	21,97%	0,07	379,56	378,59	0,97	0,61	10,20	10,20	10,20	10,20	4,94	4,94	4,94	4,94

Tabela A.7 (continuação)– Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal cálcica contaminados com fertilizante 10-20-10

A (m <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm <sup>3</sup> )	Volume solo (cm <sup>3</sup> )	Volume Cal (cm <sup>3</sup> )	Volume Vazios (cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	193,53	1,96	2,72	1,61	68,37	299,41	11,98	68,37	109,96	4,61	78,96	0,69	40,80	86,58	368	0,685	356,6071	381,3259	7			
0,00192	193,39	1,96	2,72	1,60	69,45	296,95	11,88	69,45	109,05	4,57	79,77	0,70	41,25	87,06	404	0,751	392,0892					
0,00192	194,11	1,95	2,72	1,60	68,84	298,17	11,93	68,84	109,50	4,59	80,02	0,70	41,23	86,02	409	0,761	395,2815					
0,00193	194,70	1,94	2,72	1,59	68,18	297,55	11,90	68,18	109,27	4,58	80,85	0,71	41,53	84,33	431	0,801	414,6143	436,3766	14			
0,00193	194,12	1,95	2,72	1,59	69,62	296,37	11,85	69,62	108,84	4,56	80,72	0,71	41,58	86,24	471	0,875	453,2690					
0,00193	194,77	1,95	2,72	1,59	68,69	298,64	11,95	68,69	109,67	4,59	80,50	0,70	41,33	85,34	459	0,853	441,2463					
0,00193	194,19	1,95	2,72	1,59	69,46	297,10	11,88	69,46	109,11	4,57	80,51	0,71	41,46	86,27	443	0,823	426,0280	460,2658	28			
0,00192	194,17	1,95	2,72	1,59	68,68	297,11	11,88	68,68	109,11	4,57	80,49	0,71	41,45	85,33	487	0,904	469,7706					
0,00193	194,38	1,96	2,72	1,60	69,20	299,02	11,96	69,20	109,81	4,60	79,97	0,70	41,14	86,53	505	0,937	484,9988					
0,00192	193,20	1,96	2,72	1,61	68,41	298,95	11,96	68,41	109,79	4,60	78,81	0,69	40,79	86,80	474	0,880	459,2093	471,0352	56			
0,00192	193,65	1,95	2,72	1,59	69,31	296,48	11,86	69,31	108,88	4,56	80,21	0,71	41,42	86,42	494	0,917	478,3864					
0,00192	193,65	1,96	2,72	1,60	69,84	297,07	11,88	69,84	109,10	4,57	79,98	0,70	41,30	87,33	491	0,911	475,5099					
0,00191	192,54	1,97	2,72	1,61	68,92	298,83	11,95	68,92	109,74	4,60	78,20	0,68	40,62	88,13	487	0,904	473,5898	479,2806	112			
0,00192	193,33	1,97	2,72	1,61	68,63	299,55	11,98	68,63	110,01	4,61	78,71	0,69	40,71	87,19	491	0,911	475,5099					
0,00192	193,13	1,97	2,72	1,61	69,53	298,34	11,93	69,53	109,56	4,59	78,98	0,69	40,89	88,04	504,8	0,937	488,7421					
0,00192	194,30	1,96	2,72	1,61	68,74	299,98	12,00	68,74	110,16	4,62	79,52	0,69	40,93	86,43	539	1,000	519,4300	518,5960				
0,00192	193,97	1,96	2,72	1,60	68,84	299,34	11,97	68,84	109,93	4,61	79,43	0,69	40,95	86,67	562	1,042	543,5888					
0,00192	195,50	1,94	2,72	1,59	68,37	299,22	11,97	68,37	109,89	4,60	81,01	0,71	41,44	84,40	509	0,944	492,7693					

Tabela A.8 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica de cura em câmara úmida

Solo	Cal	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade					Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
								Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio	
L	D	Cura úmida	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	37,95	32,36	7,45	22,44%	0,54	384,73	383,74	0,99	5,78	10,17	10,18	10,17	10,17	4,92	4,92	4,92	4,92
				B	100%	4%	21,9%	378,95	28,76	24,84	7,60	22,74%	0,84	378,80	378,42	0,38	-0,15	10,15	10,15	10,15	10,15	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,97	26,62	7,60	22,87%	0,97	378,85	379,18	-0,33	-0,10	10,14	10,14	10,14	10,14	4,92	4,92	4,92	4,92
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	34,98	29,95	7,54	22,45%	0,55	379,90	380,39	-0,49	0,95	10,18	10,19	10,19	10,19	4,93	4,92	4,93	4,93
				B	100%	4%	21,9%	378,95	28,94	25,00	7,57	22,60%	0,70	378,95	379,38	-0,43	0,00	10,13	10,14	10,14	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	37,59	32,09	7,58	22,44%	0,54	378,55	379,00	-0,45	-0,40	10,14	10,14	10,14	10,14	4,92	4,93	4,92	4,92
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	33,98	29,15	7,65	22,47%	0,57	378,35	378,59	-0,24	-0,60	10,12	10,11	10,12	10,12	4,93	4,92	4,92	4,92
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,53	27,10	7,62	22,74%	0,84	379,60	379,82	-0,22	0,65	10,13	10,13	10,13	10,13	4,93	4,94	4,93	4,93
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,79	26,48	7,56	22,78%	0,88	378,95	379,28	-0,33	0,00	10,15	10,15	10,15	10,15	4,93	4,93	4,93	4,93
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	28,76	24,88	7,70	22,58%	0,68	378,75	378,79	-0,04	-0,20	10,14	10,14	10,14	10,14	4,92	4,93	4,92	4,92
				B	100%	4%	21,9%	378,95	30,85	26,60	7,68	22,46%	0,56	379,04	379,24	-0,20	0,09	10,13	10,13	10,12	10,13	4,93	4,92	4,93	4,93
				C	100%	4%	21,9%	378,95	32,32	27,79	7,65	22,49%	0,59	378,78	378,90	-0,12	-0,17	10,15	10,14	10,14	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	35,88	30,70	7,66	22,48%	0,58	379,19	379,31	-0,12	0,24	10,12	10,13	10,13	10,13	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	28,34	24,50	7,59	22,71%	0,81	379,28	379,53	-0,25	0,33	10,14	10,14	10,14	10,14	4,95	4,95	4,94	4,95
				C	100%	4%	21,9%	378,95	29,36	25,36	7,58	22,50%	0,60	380,57	381,06	-0,49	1,62	10,14	10,14	10,14	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	31,35	26,97	7,50	22,50%	0,60	374,71	374,33	0,38	-4,24	10,00	10,00	10,01	10,00	4,90	4,90	4,91	4,90
				B	100%	4%	21,9%	378,95	27,53	23,83	7,51	22,67%	0,77	375,74	375,73	0,01	-3,21	10,09	10,11	10,09	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	28,79	24,91	7,70	22,55%	0,65	380,15	379,81	0,34	1,20	10,20	10,19	10,19	10,19	4,93	4,93	4,93	4,93

Tabela A.8 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica de cura em câmara úmida

A (m <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Wágua (g)	W <sub>solo</sub> (g)	W <sub>cal</sub> (g)	Volume água (cm <sup>3</sup> )	Volume solo (cm <sup>3</sup> )	Volume Cal (cm <sup>3</sup> )	Volume Vazios (cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cal	Solo	
															Leitura	Carga (kN)						
0,00190	193,41	1,99	2,72	1,62	70,51	302,13	12,09	70,51	110,96	4,65	77,81	0,67	40,23	90,62	128,5	0,628	330,5317	327,9703	7	Cura úmida	D	L
0,00192	194,54	1,95	2,72	1,59	70,17	296,76	11,87	70,17	108,98	4,57	80,99	0,71	41,63	86,64	128	0,626	326,6151					
0,00190	192,78	1,97	2,72	1,60	70,52	296,47	11,86	70,52	108,88	4,56	79,34	0,70	41,16	88,88	127	0,621	326,7642					
0,00191	194,19	1,96	2,72	1,60	69,64	298,33	11,93	69,64	109,56	4,59	80,04	0,70	41,22	87,00	130	0,636	333,3950	337,9572	14			
0,00192	194,28	1,95	2,72	1,59	69,87	297,19	11,89	69,87	109,14	4,57	80,57	0,71	41,47	86,72	131	0,640	334,0890					
0,00190	193,04	1,96	2,72	1,60	69,38	297,28	11,89	69,38	109,17	4,57	79,29	0,70	41,08	87,50	135	0,659	346,3877					
0,00190	192,60	1,96	2,72	1,60	69,40	297,06	11,88	69,40	109,09	4,57	78,93	0,69	40,98	87,93	139	0,679	356,4205	348,1196	28			
0,00191	193,63	1,96	2,72	1,60	70,33	297,37	11,89	70,33	109,21	4,57	79,85	0,70	41,24	88,08	134	0,655	342,4867					
0,00191	193,75	1,96	2,72	1,59	70,31	296,77	11,87	70,31	108,99	4,57	80,20	0,71	41,39	87,67	135	0,659	345,4515					
0,00190	193,04	1,96	2,72	1,60	69,78	297,09	11,88	69,78	109,10	4,57	79,37	0,70	41,11	87,92	364	0,678	356,1338	351,1697	56			
0,00191	193,05	1,96	2,72	1,60	69,53	297,61	11,90	69,53	109,29	4,58	79,17	0,70	41,01	87,81	359	0,669	350,8318					
0,00192	194,41	1,95	2,72	1,59	69,55	297,33	11,89	69,55	109,19	4,57	80,64	0,71	41,48	86,25	356,5	0,664	346,5434					
0,00192	194,09	1,95	2,72	1,60	69,60	297,68	11,91	69,60	109,32	4,58	80,19	0,70	41,32	86,79	373	0,695	362,3645	359,8062	112			
0,00192	194,87	1,95	2,72	1,59	70,19	297,20	11,89	70,19	109,15	4,57	81,16	0,71	41,65	86,49	368	0,685	356,6071					
0,00192	194,35	1,96	2,72	1,60	69,89	298,73	11,95	69,89	109,71	4,60	80,05	0,70	41,19	87,31	371	0,691	360,4468					
0,00189	188,89	1,98	2,72	1,62	68,81	294,13	11,77	68,81	108,02	4,53	76,35	0,68	40,42	90,13	364	0,678	359,0450	359,8308				
0,00192	193,52	1,94	2,72	1,58	69,44	294,52	11,78	69,44	108,16	4,53	80,83	0,72	41,77	85,91	367	0,684	356,6114					
0,00191	194,58	1,95	2,72	1,59	69,94	298,28	11,93	69,94	109,54	4,59	80,45	0,70	41,35	86,93	373	0,695	363,8361					

Tabela A.9 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica de cura em câmara sem controle de umidade

Solo	Cal	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade					Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
								Peso úmido	Peso Seco	Umidade	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença úmido	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio	
L	D	Cura seca	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,90	26,70	7,60	21,99%	0,09	377,94	378,92	-0,98	-1,01	10,09	10,09	10,09	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	32,74	28,11	7,66	22,64%	0,74	378,37	379,27	-0,90	-0,58	10,09	10,09	10,09	10,09	4,96	4,96	4,96	4,96
				C	100%	4%	21,9%	378,95	29,74	25,74	7,55	21,99%	0,09	375,65	376,58	-0,93	-3,30	10,08	10,08	10,08	10,08	4,95	4,94	4,94	4,94
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	32,49	28,00	7,63	22,04%	0,14	378,61	379,85	-1,24	-0,34	10,11	10,11	10,11	10,11	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,45	27,10	7,56	22,26%	0,36	375,53	377,03	-1,50	-3,42	10,12	10,12	10,12	10,12	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,67	26,51	7,64	22,05%	0,15	376,08	377,27	-1,19	-2,87	10,11	10,11	10,11	10,11	4,95	4,95	4,95	4,95
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,73	26,56	7,55	21,94%	0,04	376,91	378,95	-2,04	-2,04	10,10	10,10	10,10	10,10	4,92	4,92	4,92	4,92
				B	100%	4%	21,9%	378,95	30,35	26,17	7,62	22,53%	0,63	375,94	377,62	-1,68	-3,01	10,17	10,16	10,17	10,17	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	31,70	27,26	7,60	22,58%	0,68	375,24	377,05	-1,81	-3,71	10,14	10,14	10,14	10,14	4,95	4,95	4,95	4,95
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	31,00	26,71	7,48	22,31%	0,41	374,58	379,19	-4,61	-4,37	10,09	10,09	10,09	10,09	4,97	4,97	4,97	4,97
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,27	26,92	7,65	22,57%	0,67	372,39	376,94	-4,55	-6,56	10,14	10,14	10,14	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,11	25,95	7,70	22,79%	0,89	372,87	377,67	-4,80	-6,08	10,14	10,14	10,14	10,14	4,95	4,95	4,95	4,95
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	38,21	32,61	7,43	22,24%	0,34	370,90	378,61	-7,71	-8,05	10,07	10,07	10,07	10,07	4,93	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	36,48	31,22	7,52	22,19%	0,29	369,63	378,40	-8,77	-9,32	10,09	10,09	10,09	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	36,71	31,48	7,60	21,90%	0,00	371,81	379,28	-7,47	-7,14	10,06	10,07	10,08	10,07	4,94	4,95	4,95	4,95
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	34,43	29,55	7,64	22,27%	0,37	367,40	378,87	-11,47	-11,55	10,08	10,09	10,09	10,09	4,95	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	29,94	25,88	7,70	22,33%	0,43	369,52	378,56	-9,04	-9,43	10,08	10,08	10,08	10,08	4,96	4,97	4,97	4,97
				C	100%	4%	21,9%	378,95	29,13	25,25	7,69	22,10%	0,20	367,51	376,74	-9,23	-11,44	10,04	10,06	10,06	10,05	4,98	4,98	4,98	4,98

Tabela A.9 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com dolomítica de cura em câmara sem controle de umidade

A (m²)	Vol (cm³)	γn (g/cm³)	γs (g/cm³)	γd (g/cm³)	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm³)	Volume solo (cm³)	Volume Cal (cm³)	Volume Vazios (cm³)	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cura seca	D	L
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	193,39	1,95	2,72	1,60	68,13	297,90	11,92	68,13	109,40	4,58	79,41	0,70	41,06	85,79	345,2	0,643	335,7083	318,0215	7	Cura seca	D	L
0,00193	194,96	1,94	2,72	1,58	69,85	296,65	11,87	69,85	108,94	4,56	81,45	0,72	41,78	85,76	318	0,593	307,1354					
0,00192	193,46	1,94	2,72	1,59	67,72	296,09	11,84	67,72	108,74	4,56	80,17	0,71	41,44	84,47	320,1	0,597	311,2208					
0,00192	193,77	1,95	2,72	1,60	68,38	298,30	11,93	68,38	109,55	4,59	79,64	0,70	41,10	85,87	351	0,654	341,2697	334,6115	14			
0,00192	193,97	1,94	2,72	1,58	68,38	295,34	11,81	68,38	108,46	4,54	80,96	0,72	41,74	84,46	357,5	0,666	347,5022					
0,00192	194,56	1,93	2,72	1,58	67,93	296,30	11,85	67,93	108,81	4,56	81,19	0,72	41,73	83,67	325	0,606	315,0625					
0,00190	192,02	1,96	2,72	1,61	67,80	297,22	11,89	67,80	109,15	4,57	78,29	0,69	40,77	86,60	354	0,660	346,9499	339,3440	28			
0,00192	194,86	1,93	2,72	1,57	69,13	295,01	11,80	69,13	108,34	4,54	81,98	0,73	42,07	84,33	337,5	0,629	328,3251					
0,00192	195,14	1,92	2,72	1,57	69,13	294,34	11,77	69,13	108,09	4,53	82,52	0,73	42,29	83,78	354	0,660	342,7571					
0,00194	195,75	1,91	2,72	1,56	68,32	294,48	11,78	68,32	108,14	4,53	83,07	0,74	42,44	82,25	351	0,654	337,1621	343,7401	56			
0,00192	194,35	1,92	2,72	1,56	68,58	292,12	11,68	68,58	107,28	4,49	82,57	0,74	42,49	83,05	352	0,656	342,2285					
0,00192	195,14	1,91	2,72	1,56	69,22	291,97	11,68	69,22	107,23	4,49	83,42	0,75	42,75	82,97	363,5	0,677	351,8295					
0,00191	192,75	1,92	2,72	1,57	67,48	291,75	11,67	67,48	107,14	4,49	81,12	0,73	42,08	83,19	371	0,691	360,9338	351,3525	112			
0,00192	193,39	1,91	2,72	1,56	67,14	290,86	11,63	67,14	106,82	4,47	82,10	0,74	42,45	81,77	362	0,674	351,8171					
0,00192	193,53	1,92	2,72	1,58	66,80	293,28	11,73	66,80	107,70	4,51	81,31	0,72	42,02	82,15	352	0,656	341,3067					
0,00192	194,11	1,89	2,72	1,55	66,92	288,92	11,56	66,92	106,10	4,44	83,56	0,76	43,05	80,09	373	0,695	360,9019	351,3986	140			
0,00194	195,29	1,89	2,72	1,55	67,46	290,44	11,62	67,46	106,66	4,47	84,16	0,76	43,09	80,16	362	0,674	348,0493					
0,00195	195,82	1,88	2,72	1,54	66,51	289,42	11,58	66,51	106,29	4,45	85,08	0,77	43,45	78,17	361	0,672	345,2446					

Tabela A.10 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica contaminados com fertilizante 05-20-20

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
L	D	A1	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	29,26	25,27	7,66	22,66%	0,76	378,80	378,75	0,05	-0,15	10,13	10,13	10,13	10,13	4,92	4,92	4,92	4,92
				B	100%	4%	21,9%	378,95	30,61	26,35	7,55	22,66%	0,76	379,52	379,94	-0,42	0,57	10,15	10,15	10,15	10,15	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	29,68	25,61	7,60	22,60%	0,70	379,28	379,60	-0,32	0,33	10,11	10,12	10,12	10,12	4,94	4,94	4,94	4,94
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	25,62	22,31	7,64	22,56%	0,66	379,70	380,00	-0,30	0,75	10,12	10,12	10,12	10,12	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	30,26	26,11	7,60	22,42%	0,52	381,39	380,59	0,80	2,44	10,15	10,15	10,15	10,15	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	27,77	24,07	7,61	22,48%	0,58	379,38	378,61	0,77	0,43	10,13	10,14	10,13	10,13	4,96	4,96	4,96	4,96
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	26,95	23,35	7,56	22,80%	0,90	378,80	379,20	-0,40	-0,15	10,13	10,13	10,13	10,13	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	28,34	24,54	7,67	22,53%	0,63	379,35	379,56	-0,21	0,40	10,11	10,11	10,11	10,11	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,42	26,24	7,74	22,59%	0,69	378,27	378,46	-0,19	-0,68	10,08	10,08	10,08	10,08	4,96	4,96	4,96	4,96
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	25,95	22,59	7,68	22,54%	0,64	379,59	379,90	-0,31	0,64	10,11	10,11	10,11	10,11	4,92	4,92	4,92	4,92
				B	100%	4%	21,9%	378,95	28,69	24,80	7,55	22,55%	0,65	379,58	380,09	-0,51	0,63	10,13	10,13	10,13	10,13	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	28,63	24,77	7,58	22,45%	0,55	379,09	378,84	0,25	0,14	10,08	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	26,46	22,99	7,56	22,49%	0,59	380,40	380,28	0,12	1,45	10,12	10,13	10,12	10,12	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	28,97	25,02	7,47	22,51%	0,51	379,86	380,10	-0,24	0,91	10,13	10,13	10,13	10,13	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	31,92	27,43	7,68	22,73%	0,83	379,35	379,61	-0,26	0,40	10,14	10,14	10,14	10,14	4,93	4,93	4,93	4,93
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	31,92	27,43	7,68	22,73%	0,83	378,72	379,61	-0,89	-0,23	10,14	10,14	10,14	10,14	4,93	4,93	4,93	4,93
				B	100%	4%	21,9%	378,95	28,79	24,91	7,70	22,55%	0,65	380,82	378,63	2,19	1,87	10,19	10,19	10,20	10,19	4,93	4,93	4,93	4,93
				C	100%	4%	21,9%	378,95	28,93	25,01	7,57	22,48%	0,58	379,61	379,54	0,07	0,66	10,12	10,12	10,11	10,12	4,95	4,94	4,94	4,94

Tabela A.10 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com dolomítica contaminados com fertilizante 05-20-20

A (m²)	Vol (cm³)	γ <sub>n</sub> (g/cm³)	γ <sub>s</sub> (g/cm³)	γ <sub>d</sub> (g/cm³)	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm3)	Volume solo (cm3)	Volume Cal (cm3)	Volume Vazios (cm3)	Índice de vazios (calculado)	Porosida de (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00190	192,59	1,97	2,72	1,60	69,97	296,95	11,88	69,97	109,05	4,57	78,97	0,70	41,00	88,61	120	0,588	309,1829	293,3998	7	A1	D	L
0,00192	194,54	1,95	2,72	1,59	70,11	297,51	11,90	70,11	109,26	4,58	80,71	0,71	41,49	86,87	108	0,531	276,7886					
0,00192	193,90	1,96	2,72	1,60	69,91	297,47	11,90	69,91	109,24	4,58	80,08	0,70	41,30	87,30	115	0,564	294,2279					
0,00192	193,97	1,96	2,72	1,60	69,90	297,88	11,92	69,90	109,40	4,58	79,99	0,70	41,24	87,39	135	0,659	344,0543	313,9880	14			
0,00192	194,54	1,96	2,72	1,60	69,85	299,56	11,98	69,85	110,01	4,61	79,92	0,70	41,08	87,40	340	0,634	330,7222					
0,00193	195,80	1,94	2,72	1,58	69,63	297,84	11,91	69,63	109,38	4,58	81,84	0,72	41,80	85,08	276	0,516	267,1874					
0,00192	194,16	1,95	2,72	1,59	70,33	296,61	11,86	70,33	108,93	4,56	80,67	0,71	41,55	87,18	116,5	0,571	297,9649	319,8707	28			
0,00192	193,77	1,96	2,72	1,60	69,74	297,70	11,91	69,74	109,33	4,58	79,87	0,70	41,22	87,32	114	0,559	291,7366					
0,00193	194,77	1,94	2,72	1,58	69,72	296,69	11,87	69,72	108,96	4,56	81,25	0,72	41,71	85,81	384	0,715	369,9107					
0,00190	192,21	1,97	2,72	1,61	69,81	297,87	11,91	69,81	109,39	4,58	78,24	0,69	40,70	89,23	346	0,645	339,2165	322,5042	56			
0,00192	194,16	1,96	2,72	1,60	69,85	297,82	11,91	69,85	109,37	4,58	80,20	0,70	41,31	87,09	314	0,586	305,7919					
0,00192	193,20	1,96	2,72	1,60	69,51	297,67	11,91	69,51	109,32	4,58	79,30	0,70	41,05	87,66	0	CP perdido	-					
0,00192	194,03	1,96	2,72	1,60	69,84	298,61	11,94	69,84	109,66	4,59	79,77	0,70	41,11	87,55	374,5	0,697	363,8028	331,8072	112			
0,00192	194,16	1,96	2,72	1,60	69,79	298,15	11,93	69,79	109,49	4,59	80,08	0,70	41,24	87,15	309	0,577	300,9976					
0,00191	193,56	1,96	2,72	1,60	70,27	297,19	11,89	70,27	109,14	4,57	79,85	0,70	41,25	88,00	338,5	0,631	330,6211					
0,00191	193,56	1,96	2,72	1,59	70,15	296,70	11,87	70,15	108,96	4,56	80,04	0,71	41,35	87,65	328	0,612	320,5122	330,8012	112			
0,00191	194,58	1,96	2,72	1,60	70,06	298,81	11,95	70,06	109,73	4,60	80,25	0,70	41,24	87,30	335	0,625	327,2515					
0,00192	194,16	1,96	2,72	1,60	69,67	298,02	11,92	69,67	109,45	4,58	80,13	0,70	41,27	86,94	355	0,661	344,6398					

Tabela A.11 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica contaminados com fertilizante 00-20-20

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
L	D	B1	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	33,59	28,88	7,73	22,27%	0,37	376,92	377,41	-0,49	-2,03	10,17	10,17	10,17	10,17	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	28,12	24,34	7,67	22,68%	0,78	377,51	378,05	-0,54	-1,44	10,12	10,12	10,12	10,12	4,92	4,92	4,92	4,92
				C	100%	4%	21,9%	378,95	32,60	28,01	7,55	22,43%	0,53	381,34	382,20	-0,86	2,39	10,16	10,16	10,16	10,16	4,95	4,95	4,95	4,95
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,44	26,35	7,69	21,92%	0,02	380,37	377,36	3,01	1,42	10,15	10,15	10,15	10,15	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,82	27,45	7,64	22,06%	0,16	379,83	380,60	-0,77	0,88	10,14	10,14	10,14	10,14	4,93	4,93	4,93	4,93
				C	100%	4%	21,9%	378,95	31,44	27,09	7,61	22,33%	0,43	379,60	380,23	-0,63	0,65	10,16	10,16	10,16	10,16	4,94	4,94	4,94	4,94
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	33,28	28,55	7,50	22,47%	0,57	378,16	378,58	-0,42	-0,79	10,14	10,14	10,14	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	30,89	26,66	7,64	22,24%	0,34	378,64	379,30	-0,66	-0,31	10,12	10,12	10,12	10,12	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	33,19	28,49	7,65	22,55%	0,65	377,74	378,21	-0,47	-1,21	10,06	10,06	10,07	10,06	4,94	4,94	4,94	4,94
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,11	26,00	7,65	22,40%	0,50	378,73	379,43	-0,70	-0,22	10,16	10,16	10,16	10,16	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	35,34	30,28	7,74	22,45%	0,55	378,33	378,80	-0,47	-0,62	10,13	10,13	10,13	10,13	4,93	4,93	4,93	4,93
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,16	26,03	7,50	22,29%	0,39	377,32	377,80	-0,48	-1,63	10,09	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	32,57	28,01	7,64	22,39%	0,49	379,92	378,85	1,07	0,97	10,06	10,06	10,06	10,06	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	29,26	25,32	7,58	22,21%	0,31	378,22	376,90	1,32	-0,73	10,05	10,05	10,05	10,05	4,96	4,96	4,96	4,96
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,43	26,24	7,67	22,56%	0,66	379,66	378,32	1,34	0,71	10,04	10,04	10,04	10,04	4,94	4,94	4,94	4,94
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	29,55	25,51	7,64	22,61%	0,71	381,78	380,60	1,18	2,83	10,08	10,08	10,08	10,08	4,95	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,41	27,11	7,67	22,12%	0,22	379,49	375,52	3,97	0,54	10,08	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,61	26,48	7,63	21,91%	0,01	379,46	378,32	1,14	0,51	10,09	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94

Tabela A.11 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com dolomítica contaminados com fertilizante 00-20-20

A (m²)	Vol (cm³)	γn (g/cm³)	γs (g/cm³)	γd (g/cm³)	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm3)	Volume solo (cm3)	Volume Cal (cm3)	Volume Vazios (cm3)	Índice de vazios (calculado)	Porosida de (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	194,92	1,93	2,72	1,58	68,65	296,41	11,86	68,65	108,86	4,56	81,51	0,72	41,82	84,22	302,3	0,565	294,5732	270,5697	7			
0,00190	192,40	1,96	2,72	1,60	69,78	295,89	11,84	69,78	108,67	4,55	79,18	0,70	41,15	88,13	255,5	0,479	251,7329					
0,00192	195,52	1,95	2,72	1,59	69,87	299,49	11,98	69,87	109,98	4,61	80,93	0,71	41,39	86,34	273	0,511	265,4031					
0,00192	194,54	1,96	2,72	1,60	68,38	299,99	12,00	68,38	110,17	4,62	79,76	0,69	41,00	85,74	293	0,548	285,6559	272,3640	14			
0,00191	193,56	1,96	2,72	1,61	68,65	299,22	11,97	68,65	109,88	4,60	79,07	0,69	40,85	86,81	269,3	0,504	263,9986					
0,00192	194,73	1,95	2,72	1,59	69,29	298,37	11,93	69,29	109,57	4,59	80,57	0,71	41,37	86,01	274	0,513	267,4375					
0,00192	194,35	1,95	2,72	1,59	69,38	296,90	11,88	69,38	109,03	4,57	80,75	0,71	41,55	85,93	257	0,481	251,1369	281,8204	28			
0,00192	193,97	1,95	2,72	1,60	68,89	297,84	11,91	68,89	109,38	4,58	80,00	0,70	41,25	86,11	290	0,542	282,7793					
0,00192	192,88	1,96	2,72	1,60	69,51	296,37	11,85	69,51	108,84	4,56	79,48	0,70	41,21	87,46	320	0,597	311,5450					
0,00192	194,73	1,94	2,72	1,59	69,30	297,52	11,90	69,30	109,26	4,58	80,89	0,71	41,54	85,68	287	0,536	279,9027	273,9725	56			
0,00191	193,37	1,96	2,72	1,60	69,36	297,09	11,88	69,36	109,10	4,57	79,70	0,70	41,22	87,03	273,5	0,512	268,0422					
0,00192	193,52	1,95	2,72	1,59	68,77	296,68	11,87	68,77	108,95	4,56	80,00	0,70	41,34	85,96	316	0,590	307,7096					
0,00192	192,82	1,97	2,72	1,61	69,49	298,49	11,94	69,49	109,62	4,59	78,61	0,69	40,77	88,41	283	0,529	276,0673	266,7638	112			
0,00193	194,19	1,95	2,72	1,59	68,74	297,58	11,90	68,74	109,28	4,58	80,32	0,71	41,36	85,57	257	0,481	249,1157					
0,00192	192,43	1,97	2,72	1,61	69,89	297,85	11,91	69,89	109,38	4,58	78,47	0,69	40,78	89,08	282	0,527	275,1084					
0,00192	193,98	1,97	2,72	1,61	70,40	299,41	11,98	70,40	109,95	4,61	79,42	0,69	40,94	88,64	273	0,511	265,4031	263,2436				
0,00192	193,20	1,96	2,72	1,61	68,74	298,80	11,95	68,74	109,73	4,60	78,87	0,69	40,82	87,15	272	0,509	265,5198					
0,00192	193,26	1,96	2,72	1,61	68,20	299,29	11,97	68,20	109,91	4,60	78,75	0,69	40,75	86,60	265	0,496	258,8078					

Tabela A.12 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica contaminados com fertilizante 00-25-25

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
L	D	C1	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	26,73	23,22	7,64	22,53%	0,63	381,15	381,39	-0,24	2,20	10,11	10,12	10,11	10,11	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	36,59	31,36	7,51	21,93%	0,03	376,17	376,60	-0,43	-2,78	10,11	10,11	10,11	10,11	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	26,78	23,31	7,59	22,07%	0,17	378,13	377,00	1,13	-0,82	10,11	10,10	10,09	10,10	4,91	4,92	4,92	4,92
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	26,38	22,98	7,69	22,24%	0,34	378,04	378,45	-0,41	-0,91	10,13	10,13	10,13	10,13	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	33,40	28,76	7,52	21,85%	-0,05	381,41	382,09	-0,68	2,46	10,14	10,15	10,14	10,14	4,94	4,95	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,99	26,74	7,42	22,00%	0,10	379,09	379,84	-0,75	0,14	10,11	10,11	10,11	10,11	4,94	4,94	4,94	4,94
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	27,88	24,18	7,58	22,29%	0,39	377,73	378,37	-0,64	-1,22	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	35,33	30,28	7,47	22,14%	0,24	378,07	378,70	-0,63	-0,88	10,09	10,09	10,10	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	30,94	26,58	7,46	22,80%	0,90	378,21	378,66	-0,45	-0,74	10,11	10,11	10,11	10,11	4,94	4,94	4,94	4,94
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	26,76	23,31	7,57	21,92%	0,02	378,14	378,50	-0,36	-0,81	10,11	10,11	10,11	10,11	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	35,48	30,45	7,53	21,95%	0,05	377,84	378,68	-0,84	-1,11	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	34,47	29,58	7,60	22,25%	0,35	377,99	378,42	-0,43	-0,96	10,09	10,09	10,09	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	31,28	26,99	7,56	22,08%	0,18	382,66	381,50	1,16	3,71	10,14	10,14	10,12	10,13	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,53	27,20	7,59	22,08%	0,18	378,95	377,75	1,20	0,00	10,06	10,06	10,06	10,06	4,94	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	21,9%	378,95	32,05	27,60	7,51	22,15%	0,25	379,58	378,42	1,16	0,63	10,08	10,09	10,10	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,51	26,35	7,47	22,03%	0,13	380,60	379,16	1,44	1,65	10,09	10,09	10,09	10,09	4,92	4,93	4,94	4,93
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,47	27,15	7,70	22,21%	0,31	379,01	377,56	1,45	0,06	10,16	10,16	10,16	10,16	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	31,73	27,37	7,54	21,99%	0,09	379,79	378,37	1,42	0,84	10,07	10,08	10,08	10,08	4,95	4,94	4,94	4,94

Tabela A.12 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com dolomítica contaminados com fertilizante 00-25-25

A (m²)	Vol (cm³)	γn (g/cm³)	γs (g/cm³)	γd (g/cm³)	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm3)	Volume solo (cm3)	Volume Cal (cm3)	Volume Vazios (cm3)	Índice de vazios (calculado)	Porosida de (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	193,84	1,97	2,72	1,60	70,08	299,11	11,96	70,08	109,84	4,60	79,39	0,69	40,96	88,27	256	0,480	250,1781	250,6575	7			
0,00192	193,77	1,94	2,72	1,59	67,65	296,65	11,87	67,65	108,94	4,56	80,27	0,71	41,42	84,29	257	0,481	251,1369					
0,00190	191,76	1,97	2,72	1,62	68,37	297,84	11,91	68,37	109,38	4,58	77,80	0,68	40,57	87,89	302	0,564	297,0854					
0,00192	194,16	1,95	2,72	1,59	68,77	297,37	11,89	68,77	109,21	4,57	80,37	0,71	41,40	85,56	256	0,480	250,1781	251,7566	14			
0,00192	194,68	1,96	2,72	1,61	68,38	300,99	12,04	68,38	110,54	4,63	79,51	0,69	40,84	86,01	263	0,492	256,5438					
0,00192	193,77	1,96	2,72	1,60	68,36	298,78	11,95	68,36	109,73	4,60	79,45	0,69	41,00	86,03	254,3	0,476	248,5480					
0,00192	193,58	1,95	2,72	1,60	68,85	297,00	11,88	68,85	109,07	4,57	79,94	0,70	41,30	86,12	272	0,509	265,5198	270,6337	28			
0,00192	193,45	1,95	2,72	1,60	68,53	297,63	11,91	68,53	109,30	4,58	79,57	0,70	41,13	86,12	299	0,559	291,4090					
0,00192	193,77	1,95	2,72	1,59	70,23	296,13	11,85	70,23	108,75	4,56	80,46	0,71	41,53	87,28	261	0,489	254,9724					
0,00192	193,77	1,95	2,72	1,60	67,98	298,23	11,93	67,98	109,52	4,59	79,66	0,70	41,11	85,34	287	0,536	279,9027	268,8758	56			
0,00192	193,58	1,95	2,72	1,60	68,00	297,93	11,92	68,00	109,41	4,58	79,59	0,70	41,11	85,44	251,5	0,471	245,8632					
0,00192	193,39	1,95	2,72	1,60	68,79	297,31	11,89	68,79	109,18	4,57	79,63	0,70	41,18	86,38	288	0,538	280,8616					
0,00192	194,22	1,97	2,72	1,61	69,21	301,40	12,06	69,21	110,69	4,64	78,90	0,68	40,62	87,72	256	0,480	250,1781	251,8677	112			
0,00192	193,34	1,96	2,72	1,61	68,54	298,47	11,94	68,54	109,61	4,59	79,13	0,69	40,93	86,61	260	0,487	253,3293					
0,00192	193,39	1,96	2,72	1,61	68,83	298,80	11,95	68,83	109,73	4,60	79,06	0,69	40,88	87,06	258	0,483	252,0958					
0,00191	192,61	1,98	2,72	1,62	68,72	299,89	12,00	68,72	110,13	4,61	77,86	0,68	40,43	88,26	265	0,496	259,8588	244,3510				
0,00192	194,73	1,95	2,72	1,59	68,88	298,20	11,93	68,88	109,51	4,59	80,63	0,71	41,41	85,43	246	0,461	240,5895					
0,00192	193,40	1,96	2,72	1,61	68,45	299,36	11,97	68,45	109,94	4,61	78,85	0,69	40,77	86,81	238	0,446	232,6046					

Tabela A.13 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com cal dolomítica contaminados com fertilizante 10-20-10

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade					Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)			
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
L	D	D1	7	A	100%	4%	21,9%	378,95	36,81	31,47	7,45	22,23%	0,33	378,83	379,43	-0,60	-0,12	10,11	10,12	10,12	10,12	4,97	4,97	4,97	4,97
				B	100%	4%	21,9%	378,95	33,71	28,89	7,50	22,53%	0,63	377,36	377,85	-0,49	-1,59	10,09	10,09	10,09	10,09	4,92	4,92	4,92	4,92
				C	100%	4%	21,9%	378,95	34,43	29,69	7,50	21,36%	-0,54	376,67	377,18	-0,51	-2,28	10,07	10,07	10,07	10,07	4,95	4,95	4,95	4,95
			14	A	100%	4%	21,9%	378,95	34,98	30,01	7,65	22,23%	0,33	376,84	377,41	-0,57	-2,11	10,08	10,08	10,08	10,08	4,96	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,24	26,92	7,66	22,43%	0,53	377,32	377,88	-0,56	-1,63	10,11	10,11	10,11	10,11	4,92	4,92	4,92	4,92
				C	100%	4%	21,9%	378,95	33,02	28,42	7,59	22,08%	0,18	377,63	378,50	-0,87	-1,32	10,09	10,09	10,09	10,09	4,94	4,94	4,94	4,94
			28	A	100%	4%	21,9%	378,95	33,49	28,77	7,43	22,12%	0,22	377,59	378,51	-0,92	-1,36	10,10	10,10	10,10	10,10	4,91	4,91	4,91	4,91
				B	100%	4%	21,9%	378,95	32,62	28,02	7,59	22,52%	0,62	377,80	378,37	-0,57	-1,15	10,10	10,09	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	33,32	28,65	7,40	21,98%	0,08	378,24	378,85	-0,61	-0,71	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
			56	A	100%	4%	21,9%	378,95	34,96	30,02	7,60	22,03%	0,13	377,41	378,28	-0,87	-1,54	10,10	10,10	10,10	10,10	4,91	4,92	4,92	4,92
				B	100%	4%	21,9%	378,95	31,51	27,15	7,56	22,26%	0,36	378,16	378,63	-0,47	-0,79	10,08	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	33,48	28,83	7,67	21,98%	0,08	377,79	378,43	-0,64	-1,16	10,12	10,12	10,12	10,12	4,94	4,94	4,94	4,94
			112	A	100%	4%	21,9%	378,95	31,23	26,98	7,60	21,93%	0,03	380,27	379,45	0,82	1,32	10,12	10,12	10,12	10,12	4,92	4,93	4,93	4,93
				B	100%	4%	21,9%	378,95	30,67	26,50	7,79	22,29%	0,39	379,72	378,71	1,01	0,77	10,10	10,10	10,09	10,10	4,93	4,93	4,93	4,93
				C	100%	4%	21,9%	378,95	35,36	30,35	7,61	22,03%	0,13	378,18	377,44	0,74	-0,77	10,07	10,07	10,07	10,07	4,96	4,96	4,96	4,96
			140	A	100%	4%	21,9%	378,95	30,54	26,37	7,55	22,16%	0,26	379,52	378,28	1,24	0,57	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	21,9%	378,95	32,82	28,24	7,55	22,14%	0,24	380,72	379,71	1,01	1,77	10,10	10,10	10,10	10,10	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	21,9%	378,95	34,00	29,24	7,50	21,90%	0,00	379,79	378,95	0,84	0,84	10,07	10,08	10,08	10,08	4,94	4,94	4,94	4,94

Tabela A.13 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo principal com dolomítica contaminados com fertilizante 10-20-10

A (m²)	Vol (cm³)	γn (g/cm³)	γs (g/cm³)	γd (g/cm³)	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm3)	Volume solo (cm3)	Volume Cal (cm3)	Volume Vazios (cm3)	Índice de vazios (calculado)	Porosida de (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00194	196,26	1,93	2,72	1,58	68,90	298,01	11,92	68,90	109,44	4,58	82,24	0,72	41,90	83,78	287	0,536	276,5338	278,7242	7			
0,00190	191,83	1,97	2,72	1,61	69,40	296,12	11,84	69,40	108,75	4,56	78,52	0,69	40,93	88,38	256	0,480	252,2162					
0,00192	193,79	1,94	2,72	1,60	66,30	298,43	11,94	66,30	109,60	4,59	79,60	0,70	41,08	83,29	317	0,592	307,4226					
0,00193	194,24	1,94	2,72	1,59	68,53	296,45	11,86	68,53	108,87	4,56	80,81	0,71	41,60	84,80	300	0,560	290,7960	293,1186	14			
0,00190	192,21	1,96	2,72	1,60	69,13	296,34	11,85	69,13	108,83	4,56	78,82	0,70	41,01	87,70	300,5	0,561	295,2330					
0,00192	193,39	1,95	2,72	1,60	68,31	297,42	11,90	68,31	109,23	4,58	79,59	0,70	41,15	85,83	301	0,562	293,3267					
0,00189	191,24	1,97	2,72	1,62	68,39	297,31	11,89	68,39	109,18	4,57	77,48	0,68	40,51	88,27	308,5	0,576	304,2017	302,0017	28			
0,00192	193,52	1,95	2,72	1,59	69,43	296,51	11,86	69,43	108,89	4,56	80,07	0,71	41,37	86,72	317	0,592	308,6685					
0,00192	193,58	1,95	2,72	1,60	68,15	298,17	11,93	68,15	109,50	4,59	79,50	0,70	41,07	85,72	300,8	0,562	293,1350					
0,00190	191,76	1,97	2,72	1,61	68,14	297,37	11,89	68,14	109,21	4,57	77,98	0,69	40,66	87,39	292	0,546	287,4056	310,2106	56			
0,00192	193,20	1,96	2,72	1,60	68,84	297,42	11,90	68,84	109,23	4,58	79,40	0,70	41,10	86,71	335	0,625	325,9279					
0,00192	193,97	1,95	2,72	1,60	68,06	297,81	11,91	68,06	109,37	4,58	80,01	0,70	41,25	85,06	326	0,608	317,2982					
0,00191	192,92	1,97	2,72	1,62	68,39	299,88	12,00	68,39	110,13	4,61	78,18	0,68	40,52	87,49	308	0,575	301,6650	313,2855	112			
0,00191	192,74	1,97	2,72	1,61	69,21	298,57	11,94	69,21	109,65	4,59	78,49	0,69	40,73	88,17	335	0,625	327,2515					
0,00193	194,57	1,94	2,72	1,59	68,28	297,98	11,92	68,28	109,43	4,58	80,56	0,71	41,40	84,76	322	0,601	310,9399					
0,00192	193,58	1,96	2,72	1,60	68,84	298,73	11,95	68,84	109,71	4,60	79,28	0,69	40,95	86,83	325	0,606	316,3393	313,4628				
0,00192	193,58	1,97	2,72	1,61	69,00	299,73	11,99	69,00	110,07	4,61	78,90	0,69	40,76	87,46	321,5	0,600	312,9833					
0,00192	193,13	1,97	2,72	1,61	68,22	299,59	11,98	68,22	110,02	4,61	78,50	0,68	40,65	86,90	319,5	0,596	311,0656					

Tabela A.14 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
E				1	100%	0%	32,2%	376,99	29,34	24,01	7,57	32,42%	0,22	374,74	374,74	0,00	-2,25	10,15	10,16	10,16	10,16	4,95	4,94	4,94	4,94
				2	100%	0%	32,2%	376,99	27,04	22,23	7,73	33,17%	0,97	375,07	375,07	0,00	-1,92	10,15	10,14	10,15	10,15	4,94	4,94	4,94	4,94
				3	100%	0%	32,2%	376,99	30,64	24,97	7,50	32,46%	0,26	374,63	374,63	0,00	-2,36	10,07	10,07	10,07	10,07	4,94	4,94	4,94	4,94
				4	100%	0%	32,2%	376,99	29,81	24,43	7,70	32,16%	-0,04	375,46	375,46	0,00	-1,53	10,13	10,13	10,13	10,13	4,96	4,96	4,96	4,96
				5	100%	0%	32,2%	376,99	31,88	25,81	7,50	33,15%	0,95	375,77	375,77	0,00	-1,22	10,05	10,05	10,05	10,05	4,96	4,96	4,96	4,96

Tabela A.14 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário

A (m <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>água</sub> (g)	W <sub>solo</sub> (g)	W <sub>cal</sub> (g)	Volume água (cm <sup>3</sup> )	Volume solo (cm <sup>3</sup> )	Volume Cal (cm <sup>3</sup> )	Volume Vazios (cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	194,93	1,92	2,88	1,45	91,75	282,99	0,00	91,75	98,43	0,00	96,50	0,98	49,50	95,08	177	0,334	174,1931	159,8867				E
0,00192	194,48	1,93	2,88	1,45	93,43	281,64	0,00	93,43	97,96	0,00	96,51	0,99	49,63	96,80	169	0,320	166,7574					
0,00192	193,01	1,94	2,88	1,47	91,80	282,83	0,00	91,80	98,38	0,00	94,63	0,96	49,03	97,00	155	0,294	153,3334					
0,00193	195,73	1,92	2,88	1,45	91,36	284,10	0,00	91,36	98,82	0,00	96,92	0,98	49,51	94,27	155	0,294	152,0993					
0,00193	194,19	1,94	2,88	1,45	93,56	282,21	0,00	93,56	98,16	0,00	96,03	0,98	49,45	97,43	156	0,296	153,0504					

Tabela A.15 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica de cura em câmara úmida

Solo	Cal	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade					Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
								Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio	
E	D	Cura úmida	7	A	100%	4%	31,8%	377,00	35,86	28,93	7,50	32,34%	0,54	374,95	375,17	-0,22	-2,05	10,20	10,24	10,21	10,22	4,95	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	30,57	24,94	7,70	32,66%	0,86	374,97	375,02	-0,05	-2,03	10,27	10,28	10,28	10,28	4,92	4,93	4,93	4,93
				C	100%	4%	31,8%	377,00	28,99	23,66	7,47	32,92%	1,12	376,12	375,91	0,21	-0,88	10,23	10,23	10,24	10,23	4,93	4,93	4,93	4,93
			14	A	100%	4%	31,8%	377,00	36,99	29,73	7,50	32,66%	0,86	375,78	375,92	-0,14	-1,22	10,24	10,25	10,24	10,24	4,93	4,92	4,93	4,93
				B	100%	4%	31,8%	377,00	28,95	23,69	7,50	32,49%	0,69	375,30	375,31	-0,01	-1,70	10,19	10,20	10,20	10,20	4,92	4,94	4,94	4,93
				C	100%	4%	31,8%	377,00	31,93	25,95	7,50	32,41%	0,61	376,12	376,22	-0,10	-0,88	10,24	10,25	10,25	10,25	4,92	4,92	4,92	4,92
			28	A	100%	4%	31,8%	377,00	30,47	24,90	7,68	32,35%	0,55	375,73	375,74	-0,01	-1,27	10,26	10,27	10,25	10,26	4,94	4,93	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	28,46	23,36	7,69	32,55%	0,75	375,88	375,94	-0,06	-1,12	10,24	10,25	10,26	10,25	4,93	4,92	4,93	4,93
				C	100%	4%	31,8%	377,00	30,36	24,82	7,67	32,30%	0,50	376,06	376,26	-0,20	-0,94	10,20	10,20	10,20	10,20	4,92	4,92	4,92	4,92
			56	A	100%	4%	31,8%	377,00	32,35	26,30	7,60	32,35%	0,55	377,23	377,22	0,01	0,23	10,24	10,24	10,25	10,24	4,93	4,92	4,93	4,93
				B	100%	4%	31,8%	377,00	28,36	23,27	7,58	32,44%	0,64	377,65	377,56	0,09	0,65	10,22	10,22	10,22	10,22	4,92	4,92	4,92	4,92
				C	100%	4%	31,8%	377,00	28,92	23,67	7,65	32,77%	0,97	376,92	376,93	-0,01	-0,08	10,24	10,24	10,24	10,24	4,93	4,93	4,92	4,93
			112	A	100%	4%	31,8%	377,00	26,96	22,20	7,51	32,40%	0,60	376,76	376,57	0,19	-0,24	10,27	10,27	10,27	10,27	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	28,92	23,74	7,60	32,09%	0,29	375,98	376,07	-0,09	-1,02	10,21	10,21	10,21	10,21	4,93	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	30,31	24,75	7,60	32,42%	0,62	376,70	376,79	-0,09	-0,30	10,26	10,26	10,26	10,26	4,93	4,93	4,93	4,93
			140	A	100%	4%	31,8%	377,00	29,46	24,11	7,69	32,58%	0,78	376,55	376,22	0,33	-0,45	10,24	10,24	10,23	10,24	4,92	4,92	4,92	4,92
				B	100%	4%	31,8%	377,00	29,40	24,04	7,62	32,64%	0,84	376,63	376,65	-0,02	-0,37	10,22	10,22	10,22	10,22	4,92	4,93	4,92	4,92
				C	100%	4%	31,8%	377,00	30,38	24,79	7,51	32,35%	0,55	376,89	376,83	0,06	-0,11	10,22	10,21	10,21	10,21	4,92	4,92	4,92	4,92

Tabela A.15 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica de cura em câmara úmida

A (m²)	Vol (cm³)	γn (g/cm³)	γs (g/cm³)	γd (g/cm³)	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm3)	Volume solo (cm3)	Volume Cal (cm3)	Volume Vazios (cm3)	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cal	Solo	
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	196,08	1,91	2,86	1,44	91,62	272,43	10,90	91,62	94,76	4,19	97,13	0,98	49,54	94,33	86	0,425	221,6803	211,3232	7	Cura úmida	D	E
0,00191	195,91	1,91	2,86	1,44	92,31	271,79	10,87	92,31	94,54	4,18	97,19	0,98	49,61	94,98	84,5	0,418	219,4255					
0,00191	195,34	1,93	2,86	1,45	93,16	272,08	10,88	93,16	94,64	4,19	96,52	0,98	49,41	96,51	74	0,368	192,8638					
0,00191	195,27	1,92	2,86	1,45	92,51	272,37	10,89	92,51	94,74	4,19	96,34	0,97	49,34	96,02	79	0,392	205,6489	212,7637	14			
0,00191	194,91	1,93	2,86	1,45	92,03	272,37	10,89	92,03	94,74	4,19	95,98	0,97	49,24	95,89	79,5	0,394	206,3425					
0,00190	194,81	1,93	2,86	1,46	92,07	273,13	10,93	92,07	95,00	4,20	95,60	0,96	49,08	96,30	87	0,430	226,2996					
0,00191	196,38	1,91	2,86	1,45	91,83	272,98	10,92	91,83	94,95	4,20	97,23	0,98	49,51	94,44	85	0,421	219,7848	215,5721	28			
0,00191	195,40	1,92	2,86	1,45	92,30	272,68	10,91	92,30	94,84	4,20	96,36	0,97	49,31	95,78	79	0,392	205,6489					
0,00190	193,92	1,94	2,86	1,47	91,82	273,31	10,93	91,82	95,06	4,20	94,65	0,95	48,81	97,01	224	0,421	221,2828					
0,00191	195,27	1,93	2,86	1,46	92,21	274,06	10,96	92,21	95,32	4,22	95,73	0,96	49,02	96,32	219	0,412	215,8640	222,1910	56			
0,00190	194,30	1,94	2,86	1,47	92,50	274,18	10,97	92,50	95,37	4,22	94,71	0,95	48,75	97,67	249	0,467	245,4495					
0,00191	195,21	1,93	2,86	1,45	93,03	272,97	10,92	93,03	94,95	4,20	96,06	0,97	49,21	96,85	208	0,391	205,2594					
0,00192	196,84	1,91	2,86	1,45	92,20	273,61	10,94	92,20	95,17	4,21	97,46	0,98	49,51	94,61	223,5	0,420	219,0152	216,2050	112			
0,00191	195,43	1,92	2,86	1,46	91,35	273,68	10,95	91,35	95,19	4,21	96,02	0,97	49,13	95,13	219	0,412	214,9904					
0,00191	195,85	1,92	2,86	1,45	92,23	273,53	10,94	92,23	95,14	4,21	96,50	0,97	49,27	95,57	218	0,410	214,6094					
0,00190	194,62	1,93	2,86	1,46	92,54	273,09	10,92	92,54	94,99	4,20	95,43	0,96	49,03	96,97	198,5	0,374	196,6327	209,1030	112			
0,00190	194,56	1,94	2,86	1,46	92,69	273,02	10,92	92,69	94,96	4,20	95,40	0,96	49,03	97,16	216	0,406	213,2603					
0,00190	194,17	1,94	2,86	1,47	92,12	273,82	10,95	92,12	95,24	4,21	94,72	0,95	48,78	97,26	220	0,413	217,4161					

Tabela A.16 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica de cura em câmara sem controle de umidade

Solo	Cal	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)					
								Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio	
E	D	Cura seca	7	A	100%	4%	31,8%	377,00	37,53	30,26	7,46	31,89%	0,09	375,34	375,33	0,01	-1,66	10,13	10,13	10,13	10,13	4,92	4,92	4,92	4,92
				B	100%	4%	31,8%	377,00	33,67	27,28	7,62	32,50%	0,70	375,85	375,50	0,35	-1,15	10,14	10,14	10,14	10,14	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	31,8%	377,00	32,56	26,50	7,50	31,89%	0,09	376,50	377,33	-0,83	-0,50	10,15	10,15	10,15	10,15	4,96	4,96	4,96	4,96
			14	A	100%	4%	31,8%	377,00	33,32	27,03	7,46	32,14%	0,34	375,36	375,34	0,02	-1,64	10,13	10,13	10,13	10,13	4,94	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	31,8%	377,00	37,87	30,55	7,70	32,04%	0,24	375,14	375,30	-0,16	-1,86	10,13	10,13	10,13	10,13	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	31,8%	377,00	37,60	30,35	7,55	31,80%	0,00	376,23	377,38	-1,15	-0,77	10,13	10,13	10,13	10,13	4,94	4,94	4,94	4,94
			28	A	100%	4%	31,8%	377,00	31,07	25,40	7,70	32,03%	0,23	375,95	378,18	-2,23	-1,05	10,13	10,13	10,13	10,13	4,95	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	31,93	26,01	7,52	32,02%	0,22	374,63	376,71	-2,08	-2,37	10,13	10,13	10,13	10,13	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	30,80	25,15	7,67	32,32%	0,52	373,73	376,21	-2,48	-3,27	10,13	10,13	10,13	10,13	4,94	4,94	4,94	4,94
			56	A	100%	4%	31,8%	377,00	31,16	25,43	7,57	32,08%	0,28	372,34	377,81	-5,47	-4,66	10,16	10,16	10,16	10,16	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	31,8%	377,00	32,08	26,08	7,58	32,43%	0,63	371,24	375,35	-4,11	-5,76	10,15	10,15	10,15	10,15	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	33,25	27,01	7,67	32,26%	0,46	370,97	376,31	-5,34	-6,03	10,13	10,13	10,13	10,13	4,96	4,96	4,96	4,96
			112	A	100%	4%	31,8%	377,00	31,17	25,50	7,67	31,80%	0,00	367,25	375,90	-8,65	-9,75	10,16	10,16	10,16	10,16	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	30,88	25,21	7,68	32,34%	0,54	367,83	374,92	-7,09	-9,17	10,15	10,16	10,17	10,16	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	31,50	25,70	7,65	32,13%	0,33	369,16	377,10	-7,94	-7,84	10,16	10,16	10,16	10,16	4,94	4,94	4,94	4,94
			140	A	100%	4%	31,8%	377,00	31,95	26,00	7,55	32,25%	0,45	364,95	376,12	-11,17	-12,05	10,14	10,14	10,14	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	34,49	27,97	7,65	32,09%	0,29	366,99	376,73	-9,74	-10,01	10,14	10,14	10,14	10,14	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	31,8%	377,00	34,66	28,10	7,56	31,94%	0,14	365,29	376,25	-10,96	-11,71	10,12	10,13	10,13	10,13	4,95	4,95	4,95	4,95

Tabela A.16 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com dolomítica de cura em câmara sem controle de umidade

A (m²)	Vol (cm³)	γn (g/cm³)	γs (g/cm³)	γd (g/cm³)	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm3)	Volume solo (cm3)	Volume Cal (cm3)	Volume Vazios (cm3)	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cura seca	D	E
															Leitura	Carga (kN)						
0,00190	192,59	1,95	2,86	1,48	90,75	273,65	10,95	90,75	95,18	4,21	93,20	0,94	48,39	97,37	263,5	0,493	259,4662	250,3525	7	Cura seca	D	E
0,00192	195,14	1,93	2,86	1,45	92,20	272,75	10,91	92,20	94,87	4,20	96,07	0,97	49,23	95,96	247	0,463	240,5734					
0,00193	196,12	1,92	2,86	1,46	91,05	274,48	10,98	91,05	95,47	4,22	96,43	0,97	49,17	94,42	259	0,485	251,0180					
0,00192	194,68	1,93	2,86	1,46	91,30	273,13	10,93	91,30	95,00	4,20	95,48	0,96	49,04	95,63	258,8	0,485	252,1818	253,3873	14	Cura seca	D	E
0,00192	194,94	1,92	2,86	1,46	91,02	273,19	10,93	91,02	95,02	4,20	95,72	0,96	49,10	95,09	255	0,478	248,2133					
0,00192	194,16	1,94	2,86	1,47	90,77	274,48	10,98	90,77	95,47	4,22	94,46	0,95	48,65	96,09	266	0,498	259,7667					
0,00192	194,42	1,93	2,86	1,46	91,21	273,79	10,95	91,21	95,23	4,21	94,98	0,96	48,85	96,04	254	0,476	247,9257	251,3450	28	Cura seca	D	E
0,00192	194,16	1,93	2,86	1,46	90,86	272,86	10,91	90,86	94,91	4,20	95,05	0,96	48,96	95,59	255	0,478	249,2192					
0,00192	194,16	1,92	2,86	1,45	91,29	271,58	10,86	91,29	94,46	4,18	95,52	0,97	49,20	95,58	263	0,492	256,8901					
0,00193	196,31	1,90	2,86	1,44	90,44	271,06	10,84	90,44	94,28	4,17	97,86	0,99	49,85	92,42	259	0,485	251,0180	250,1065	56	Cura seca	D	E
0,00192	194,54	1,91	2,86	1,44	90,92	269,54	10,78	90,92	93,75	4,15	96,64	0,99	49,68	94,08	257	0,481	251,1369					
0,00193	195,73	1,90	2,86	1,43	90,49	269,69	10,79	90,49	93,80	4,15	97,78	1,00	49,96	92,55	256	0,480	248,1646					
0,00192	194,73	1,89	2,86	1,43	88,61	267,92	10,72	88,61	93,19	4,12	97,42	1,00	50,03	90,96	246	0,461	240,5895	251,7762	112	Cura seca	D	E
0,00192	194,73	1,89	2,86	1,43	89,90	267,24	10,69	89,90	92,95	4,11	97,67	1,01	50,15	92,04	255	0,478	249,2192					
0,00192	194,73	1,90	2,86	1,43	89,77	268,64	10,75	89,77	93,44	4,13	97,16	1,00	49,89	92,40	272	0,509	265,5198					
0,00192	194,35	1,88	2,86	1,42	88,99	265,34	10,61	88,99	92,29	4,08	97,97	1,02	50,41	90,83	259	0,485	253,0547	252,6921	140	Cura seca	D	E
0,00192	195,14	1,88	2,86	1,42	89,15	267,15	10,69	89,15	92,92	4,11	98,10	1,01	50,27	90,87	261	0,489	253,9432					
0,00192	194,88	1,87	2,86	1,42	88,42	266,22	10,65	88,42	92,60	4,10	98,19	1,02	50,38	90,06	258	0,483	251,0783					

Tabela A.17 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica contaminados com fertilizante 05-20-20

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade					Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)			
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
E	D	A1	7	A	100%	4%	31,8%	377,00	27,24	22,45	7,64	32,34%	0,54	375,45	375,72	-0,27	-1,55	10,14	10,14	10,15	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	32,55	26,47	7,53	32,10%	0,30	374,15	374,96	-0,81	-2,85	10,18	10,18	10,18	10,18	4,94	4,95	4,96	4,95
				C	100%	4%	31,8%	377,00	36,26	29,25	7,50	32,23%	0,43	376,84	376,98	-0,14	-0,16	10,19	10,19	10,19	10,19	4,94	4,94	4,94	4,94
			14	A	100%	4%	31,8%	377,00	28,53	23,44	7,60	32,13%	0,33	377,94	378,25	-0,31	0,94	10,18	10,18	10,18	10,18	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	35,70	28,89	7,59	31,97%	0,17	375,93	376,02	-0,09	-1,07	10,17	10,17	10,18	10,17	4,97	4,97	4,97	4,97
				C	100%	4%	31,8%	377,00	27,34	22,53	7,62	32,26%	0,46	377,20	376,79	0,41	0,20	10,20	10,19	10,19	10,19	4,94	4,94	4,94	4,94
			28	A	100%	4%	31,8%	377,00	34,31	27,77	7,59	32,41%	0,61	376,50	376,53	-0,03	-0,50	10,17	10,17	10,17	10,17	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	31,8%	377,00	34,45	27,92	7,60	32,14%	0,34	379,17	378,88	0,29	2,17	10,24	10,24	10,24	10,24	4,96	4,96	4,96	4,96
				C	100%	4%	31,8%	377,00	34,07	27,61	7,59	32,27%	0,47	376,93	376,97	-0,04	-0,07	10,24	10,24	10,24	10,24	4,94	4,94	4,94	4,94
			56	A	100%	4%	31,8%	377,00	31,99	26,02	7,60	32,41%	0,61	377,21	377,60	-0,39	0,21	10,22	10,22	10,22	10,22	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	33,99	27,59	7,68	32,14%	0,34	377,44	377,63	-0,19	0,44	10,22	10,22	10,22	10,22	4,96	4,96	4,96	4,96
				C	100%	4%	31,8%	377,00	28,75	23,58	7,50	32,15%	0,35	376,55	376,78	-0,23	-0,45	10,23	10,23	10,23	10,23	4,95	4,95	4,95	4,95
			112	A	100%	4%	31,8%	377,00	32,75	26,60	7,73	32,59%	0,79	377,80	377,90	-0,10	0,80	10,22	10,22	10,22	10,22	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	32,12	26,20	7,61	31,85%	0,05	374,84	374,95	-0,11	-2,16	10,26	10,26	10,26	10,26	4,95	4,96	4,96	4,96
				C	100%	4%	31,8%	377,00	31,27	25,52	7,60	32,09%	0,29	375,79	376,05	-0,26	-1,21	10,25	10,24	10,24	10,24	4,95	4,95	4,95	4,95
			140	A	100%	4%	31,8%	377,00	28,81	23,60	7,60	32,56%	0,76	377,94	377,52	0,42	0,94	10,20	10,20	10,20	10,20	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	31,8%	377,00	33,92	27,56	7,60	31,86%	0,06	377,04	376,05	0,99	0,04	10,25	10,25	10,25	10,25	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	29,98	24,61	7,64	31,64%	-0,16	377,19	375,88	1,31	0,19	10,24	10,25	10,25	10,25	4,95	4,95	4,95	4,95

Tabela A.17 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com dolomítica contaminados com fertilizante 05-20-20

A (m <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm <sup>3</sup> )	Volume solo (cm <sup>3</sup> )	Volume Cal (cm <sup>3</sup> )	Volume Vazios (cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	194,41	1,93	2,86	1,46	91,76	272,78	10,91	91,76	94,88	4,20	95,33	0,96	49,04	96,25	120	0,588	306,6845	283,2297	7	A1	D	E
0,00192	195,91	1,91	2,86	1,45	90,92	272,34	10,89	90,92	94,73	4,19	96,99	0,98	49,51	93,74	273	0,511	265,4031					
0,00192	195,31	1,93	2,86	1,46	91,85	274,03	10,96	91,85	95,31	4,22	95,78	0,96	49,04	95,90	284,6	0,532	277,6014					
0,00192	195,12	1,94	2,86	1,47	91,91	275,03	11,00	91,91	95,66	4,23	95,22	0,95	48,80	96,52	128	0,626	326,6151	295,4846	14	A1	D	E
0,00194	197,36	1,90	2,86	1,44	91,07	273,90	10,96	91,07	95,27	4,21	97,88	0,98	49,59	93,05	283	0,529	272,7445					
0,00192	195,37	1,93	2,86	1,46	92,00	274,23	10,97	92,00	95,38	4,22	95,77	0,96	49,02	96,07	294,5	0,550	287,0941					
0,00193	196,51	1,92	2,86	1,45	92,15	273,41	10,94	92,15	95,10	4,21	97,20	0,98	49,46	94,81	310	0,579	299,5262	303,0183	28	A1	D	E
0,00193	197,86	1,92	2,86	1,45	92,22	275,92	11,04	92,22	95,97	4,24	97,64	0,97	49,35	94,44	323,5	0,604	312,3666					
0,00192	196,27	1,92	2,86	1,45	91,95	274,01	10,96	91,95	95,31	4,22	96,74	0,97	49,29	95,05	305	0,570	297,1622					
0,00192	195,88	1,93	2,86	1,45	92,33	273,92	10,96	92,33	95,28	4,21	96,39	0,97	49,21	95,79	321	0,599	312,5039	307,4949	56	A1	D	E
0,00193	197,47	1,91	2,86	1,45	91,81	274,64	10,99	91,81	95,53	4,23	97,72	0,98	49,49	93,96	316,2	0,590	305,4233					
0,00192	196,87	1,91	2,86	1,45	91,61	273,98	10,96	91,61	95,30	4,22	97,36	0,98	49,45	94,10	314	0,586	304,5576					
0,00192	195,88	1,93	2,86	1,45	92,86	273,98	10,96	92,86	95,30	4,22	96,37	0,97	49,20	96,36	333	0,621	324,0102	313,0092	112	A1	D	E
0,00193	197,98	1,89	2,86	1,44	90,54	273,37	10,93	90,54	95,08	4,21	98,69	0,99	49,85	91,74	300	0,560	290,4050					
0,00192	197,12	1,91	2,86	1,44	91,29	273,56	10,94	91,29	95,15	4,21	97,77	0,98	49,60	93,37	335	0,625	324,6124					
0,00193	197,08	1,92	2,86	1,45	92,84	274,14	10,97	92,84	95,35	4,22	97,52	0,98	49,48	95,20	324	0,604	312,8422	314,7512	112	A1	D	E
0,00192	196,46	1,92	2,86	1,46	91,11	274,93	11,00	91,11	95,63	4,23	96,60	0,97	49,17	94,32	327,5	0,611	318,7365					
0,00192	197,19	1,91	2,86	1,45	90,67	275,50	11,02	90,67	95,83	4,24	97,12	0,97	49,25	93,35	322,5	0,602	312,6750					

Tabela A.18 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica contaminados com fertilizante 00-20-20

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
E	D	B1	7	A	100%	4%	31,8%	377,00	34,05	27,64	7,58	31,95%	0,15	375,82	376,32	-0,50	-1,18	10,20	10,20	10,20	10,20	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	34,27	27,75	7,67	32,47%	0,67	378,70	379,02	-0,32	1,70	10,20	10,20	10,20	10,20	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	33,38	27,05	7,50	32,38%	0,58	375,11	375,69	-0,58	-1,89	10,18	10,19	10,18	10,18	4,94	4,94	4,94	4,94
			14	A	100%	4%	31,8%	377,00	30,89	25,25	7,61	31,97%	0,17	375,29	376,26	-0,97	-1,71	10,20	10,20	10,20	10,20	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	31,03	25,32	7,54	32,11%	0,31	375,64	375,15	0,49	-1,36	10,19	10,19	10,19	10,19	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	34,77	28,17	7,70	32,24%	0,44	375,74	376,01	-0,27	-1,26	10,19	10,19	10,19	10,19	4,94	4,94	4,94	4,94
			28	A	100%	4%	31,8%	377,00	30,15	24,67	7,70	32,29%	0,49	375,61	375,57	0,04	-1,39	10,20	10,20	10,20	10,20	4,94	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	31,8%	377,00	31,98	26,05	7,54	32,04%	0,24	376,24	376,65	-0,41	-0,76	10,20	10,20	10,20	10,20	4,94	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	31,8%	377,00	27,20	22,40	7,50	32,21%	0,41	375,02	375,50	-0,48	-1,98	10,18	10,18	10,18	10,18	4,92	4,92	4,92	4,92
			56	A	100%	4%	31,8%	377,00	30,24	24,75	7,84	32,47%	0,67	374,09	374,89	-0,80	-2,91	10,20	10,20	10,20	10,20	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	33,71	27,33	7,50	32,17%	0,37	375,10	375,43	-0,33	-1,90	10,20	10,20	10,20	10,20	4,91	4,92	4,92	4,92
				C	100%	4%	31,8%	377,00	29,31	24,01	7,62	32,34%	0,54	377,89	378,09	-0,20	0,89	10,20	10,18	10,18	10,19	4,94	4,94	4,94	4,94
			112	A	100%	4%	31,8%	377,00	34,72	28,13	7,50	31,94%	0,14	377,55	376,31	1,24	0,55	10,11	10,11	10,11	10,11	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	33,77	27,46	7,70	31,93%	0,13	375,71	374,81	0,90	-1,29	10,14	10,14	10,14	10,14	4,96	4,96	4,96	4,96
				C	100%	4%	31,8%	377,00	33,00	26,80	7,63	32,34%	0,54	374,83	373,65	1,18	-2,17	10,15	10,16	10,16	10,16	4,97	4,97	4,97	4,97
				A	100%	4%	31,8%	377,00	36,06	29,20	7,64	31,82%	0,02	375,48	376,65	-1,17	-1,52	10,14	10,14	10,14	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	31,36	25,56	7,60	32,29%	0,49	376,70	375,50	1,20	-0,30	10,15	10,16	10,16	10,16	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	26,18	21,70	7,69	31,98%	0,18	375,48	374,28	1,20	-1,52	10,16	10,16	10,16	10,16	4,95	4,95	4,95	4,95

Tabela A.18 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com dolomítica contaminados com fertilizante 00-20-20

A (m²)	Vol (cm³)	γn (g/cm³)	γs (g/cm³)	γd (g/cm³)	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm³)	Volume solo (cm³)	Volume Cal (cm³)	Volume Vazios (cm³)	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	195,50	1,92	2,86	1,46	91,01	273,86	10,95	91,01	95,25	4,21	96,03	0,97	49,12	94,77	269,5	0,504	263,1227	264,2413	7	B1	D	E
0,00192	195,50	1,94	2,86	1,46	92,82	274,88	11,00	92,82	95,61	4,23	95,66	0,96	48,93	97,04	266,5	0,499	260,2461					
0,00192	195,18	1,92	2,86	1,45	91,75	272,46	10,90	91,75	94,77	4,19	96,22	0,97	49,30	95,35	276	0,516	269,3553					
0,00192	195,50	1,92	2,86	1,45	90,92	273,43	10,94	90,92	95,11	4,21	96,19	0,97	49,20	94,53	272	0,509	265,5198	266,0632	14	B1	D	E
0,00192	195,31	1,92	2,86	1,46	91,31	273,39	10,94	91,31	95,09	4,21	96,01	0,97	49,16	95,11	269,5	0,504	263,1227					
0,00192	195,31	1,92	2,86	1,45	91,61	273,20	10,93	91,61	95,03	4,20	96,08	0,97	49,19	95,35	276,2	0,517	269,5470					
0,00192	196,03	1,92	2,86	1,45	91,69	273,00	10,92	91,69	94,96	4,20	96,87	0,98	49,42	94,65	283,3	0,530	275,6105	273,9898	28	B1	D	E
0,00192	196,03	1,92	2,86	1,45	91,29	273,99	10,96	91,29	95,30	4,22	96,51	0,97	49,23	94,59	286	0,535	278,1925					
0,00190	193,54	1,94	2,86	1,47	91,38	272,74	10,91	91,38	94,86	4,20	94,48	0,95	48,82	96,72	272,5	0,510	268,1662					
0,00192	195,50	1,91	2,86	1,44	91,69	271,54	10,86	91,69	94,45	4,18	96,87	0,98	49,55	94,65	276,3	0,517	269,6429	275,3005	56	B1	D	E
0,00190	193,66	1,94	2,86	1,47	91,31	272,88	10,92	91,31	94,91	4,20	94,54	0,95	48,82	96,58	289,5	0,541	284,9857					
0,00192	195,24	1,94	2,86	1,46	92,34	274,57	10,98	92,34	95,50	4,22	95,52	0,96	48,92	96,67	278	0,520	271,2730					
0,00192	193,77	1,95	2,86	1,48	91,41	275,14	11,01	91,41	95,70	4,23	93,84	0,94	48,43	97,41	280	0,524	273,1907	285,6098	112	B1	D	E
0,00193	195,93	1,92	2,86	1,45	90,94	273,82	10,95	90,94	95,24	4,21	96,47	0,97	49,24	94,26	310	0,579	299,5262					
0,00194	197,04	1,90	2,86	1,44	91,60	272,33	10,89	91,60	94,73	4,19	98,12	0,99	49,80	93,35	295	0,551	284,1123					
0,00192	194,35	1,93	2,86	1,47	90,63	273,89	10,96	90,63	95,27	4,21	94,87	0,95	48,81	95,54	295,5	0,552	288,0530					
0,00192	194,67	1,94	2,86	1,46	91,96	273,79	10,95	91,96	95,23	4,21	95,22	0,96	48,92	96,57	296	0,553	288,5324					
0,00192	195,52	1,92	2,86	1,46	90,98	273,56	10,94	90,98	95,15	4,21	96,16	0,97	49,18	94,61	299	0,559	290,2328					

Tabela A.19 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica contaminados com fertilizante 00-25-25

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
E	D	C1	7	A	100%	4%	31,8%	377,00	26,29	21,78	7,70	32,03%	0,23	376,43	376,55	-0,12	-0,57	10,19	10,19	10,19	10,19	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	32,99	26,79	7,63	32,36%	0,56	375,11	375,64	-0,53	-1,89	10,16	10,15	10,16	10,16	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	29,89	24,45	7,65	32,38%	0,58	378,15	378,59	-0,44	1,15	10,20	10,20	10,20	10,20	4,94	4,94	4,94	4,94
			14	A	100%	4%	31,8%	377,00	27,78	22,92	7,69	31,91%	0,11	374,30	375,91	-1,61	-2,70	10,17	10,17	10,17	10,17	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	36,99	29,82	7,50	32,12%	0,32	375,80	376,35	-0,55	-1,20	10,19	10,19	10,19	10,19	4,97	4,96	4,97	4,97
				C	100%	4%	31,8%	377,00	29,93	24,49	7,56	32,13%	0,33	375,91	376,65	-0,74	-1,09	10,19	10,19	10,18	10,19	4,94	4,94	4,94	4,94
			28	A	100%	4%	31,8%	377,00	27,24	22,45	7,50	32,04%	0,24	375,75	376,17	-0,42	-1,25	10,19	10,19	10,19	10,19	4,94	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	31,8%	377,00	35,51	28,74	7,51	31,89%	0,09	375,11	375,50	-0,39	-1,89	10,20	10,19	10,20	10,20	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	29,83	24,46	7,63	31,91%	0,11	376,44	376,84	-0,40	-0,56	10,19	10,19	10,19	10,19	4,94	4,94	4,94	4,94
			56	A	100%	4%	31,8%	377,00	33,93	27,57	7,58	31,82%	0,02	376,46	376,93	-0,47	-0,54	10,18	10,18	10,18	10,18	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	33,88	27,43	7,49	32,35%	0,55	375,42	376,04	-0,62	-1,58	10,19	10,18	10,18	10,18	4,96	4,96	4,96	4,96
				C	100%	4%	31,8%	377,00	30,67	25,10	7,80	32,20%	0,40	378,95	379,43	-0,48	1,95	10,20	10,20	10,19	10,20	4,95	4,95	4,95	4,95
			112	A	100%	4%	31,8%	377,00	33,71	27,41	7,63	31,85%	0,05	375,84	374,78	1,06	-1,16	10,15	10,15	10,15	10,15	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	31,8%	377,00	31,65	25,81	7,49	31,88%	0,08	377,24	376,12	1,12	0,24	10,16	10,16	10,16	10,16	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	30,62	25,04	7,55	31,90%	0,10	376,89	375,75	1,14	-0,11	10,16	10,16	10,16	10,16	4,94	4,94	4,94	4,94
				A	100%	4%	31,8%	377,00	37,20	29,93	7,54	32,47%	0,67	376,72	375,40	1,32	-0,28	10,16	10,16	10,16	10,16	4,96	4,96	4,96	4,96
				B	100%	4%	31,8%	377,00	33,76	27,39	7,55	32,11%	0,31	377,67	376,21	1,46	0,67	10,14	10,14	10,14	10,14	4,96	4,96	4,96	4,96
				C	100%	4%	31,8%	377,00	30,65	25,03	7,51	32,08%	0,28	376,64	376,36	0,28	-0,36	10,13	10,13	10,13	10,13	4,95	4,95	4,95	4,95

Tabela A.19 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com dolomítica contaminados com fertilizante 00-25-25

A (m <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm <sup>3</sup> )	Volume solo (cm <sup>3</sup> )	Volume Cal (cm <sup>3</sup> )	Volume Vazios (cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	195,31	1,93	2,86	1,46	91,32	274,14	10,97	91,32	95,35	4,22	95,74	0,96	49,02	95,39	214	0,402	209,9060	216,4582	7	C1	D	E
0,00192	194,67	1,93	2,86	1,46	91,71	272,50	10,90	91,71	94,78	4,19	95,69	0,97	49,16	95,84	210,5	0,396	206,5500					
0,00192	195,50	1,93	2,86	1,46	92,50	274,67	10,99	92,50	95,54	4,23	95,74	0,96	48,97	96,62	238	0,446	232,9186					
0,00192	194,92	1,92	2,86	1,46	90,55	272,84	10,91	90,55	94,90	4,20	95,83	0,97	49,16	94,49	225	0,423	220,4535	220,0500	14	C1	D	E
0,00194	197,42	1,90	2,86	1,44	91,37	273,49	10,94	91,37	95,13	4,21	98,09	0,99	49,68	93,15	225	0,423	218,0925					
0,00192	195,24	1,93	2,86	1,46	91,41	273,55	10,94	91,41	95,15	4,21	95,89	0,97	49,11	95,34	226,2	0,425	221,6041					
0,00192	195,83	1,92	2,86	1,45	91,18	273,63	10,95	91,18	95,17	4,21	96,45	0,97	49,25	94,53	227	0,426	221,7722	225,5275	28	C1	D	E
0,00192	195,43	1,92	2,86	1,46	90,70	273,47	10,94	90,70	95,12	4,21	96,11	0,97	49,18	94,37	237,5	0,446	232,4392					
0,00192	195,31	1,93	2,86	1,46	91,06	274,41	10,98	91,06	95,45	4,22	95,64	0,96	48,97	95,21	227	0,426	222,3712					
0,00192	195,12	1,93	2,86	1,46	90,86	274,61	10,98	90,86	95,52	4,22	95,37	0,96	48,88	95,27	247,5	0,464	242,0278	238,6169	56	C1	D	E
0,00193	196,50	1,91	2,86	1,44	91,76	272,75	10,91	91,76	94,87	4,20	97,43	0,98	49,58	94,18	244	0,457	237,0694					
0,00192	196,23	1,93	2,86	1,46	92,29	275,63	11,03	92,29	95,87	4,24	96,11	0,96	48,98	96,02	243	0,456	236,7534					
0,00193	196,12	1,92	2,86	1,45	90,79	274,09	10,96	90,79	95,33	4,22	96,57	0,97	49,24	94,02	248	0,465	240,5555	248,2490	112	C1	D	E
0,00192	194,73	1,94	2,86	1,47	91,19	275,05	11,00	91,19	95,67	4,23	94,83	0,95	48,70	96,16	256	0,480	250,1781					
0,00192	194,73	1,94	2,86	1,47	91,16	274,74	10,99	91,16	95,56	4,23	94,94	0,95	48,76	96,01	260	0,487	254,0135					
0,00193	196,31	1,92	2,86	1,45	92,34	273,44	10,94	92,34	95,11	4,21	96,99	0,98	49,41	95,20	247	0,463	239,6043	244,6946	112	C1	D	E
0,00193	195,93	1,93	2,86	1,46	91,79	274,89	11,00	91,79	95,61	4,23	96,08	0,96	49,04	95,53	253	0,474	245,3112					
0,00192	194,94	1,93	2,86	1,46	91,47	274,20	10,97	91,47	95,37	4,22	95,35	0,96	48,91	95,93	256	0,480	249,1683					

Tabela A.20 – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com cal dolomítica contaminados com fertilizante 10-20-10

Solo	Cal	Cont	Idade	CP	SOLO	CAL	Umidade (%)	Peso esperado (g)	Umidade				Peso (g)				Altura (cm)				Diâmetro (cm)				
									Peso úmido	Peso Seco	Peso cápsula	Medida	Diferença	Pós cura	Pré cura	Diferença	Diferença do esperado	h1	h2	h3	h média	φ1	φ2	φ3	φ médio
E	D	D1	7	A	100%	4%	31,8%	377,00	32,01	26,08	7,48	31,88%	0,08	376,31	376,63	-0,32	-0,69	10,18	10,18	10,18	10,18	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	35,93	29,06	7,53	31,91%	0,11	376,98	377,41	-0,43	-0,02	10,13	10,13	10,13	10,13	4,93	4,93	4,93	4,93
				C	100%	4%	31,8%	377,00	32,85	26,71	7,66	32,23%	0,43	375,54	376,04	-0,50	-1,46	10,15	10,15	10,15	10,15	4,94	4,94	4,94	4,94
			14	A	100%	4%	31,8%	377,00	31,86	26,00	7,69	32,00%	0,20	375,58	376,03	-0,45	-1,42	10,18	10,19	10,18	10,18	4,94	4,94	4,94	4,94
				B	100%	4%	31,8%	377,00	30,28	24,71	7,56	32,48%	0,68	376,01	376,16	-0,15	-0,99	10,15	10,15	10,15	10,15	4,94	4,95	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	30,84	25,22	7,70	32,08%	0,28	375,45	375,66	-0,21	-1,55	10,14	10,14	10,14	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
			28	A	100%	4%	31,8%	377,00	31,91	26,01	7,71	32,24%	0,44	375,57	376,03	-0,46	-1,43	10,18	10,19	10,18	10,18	4,94	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	31,8%	377,00	32,10	26,15	7,58	32,04%	0,24	374,95	375,21	-0,26	-2,05	10,14	10,14	10,14	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	30,32	24,79	7,55	32,08%	0,28	374,73	375,18	-0,45	-2,27	10,14	10,14	10,14	10,14	4,92	4,93	4,93	4,93
			56	A	100%	4%	31,8%	377,00	32,64	26,57	7,74	32,24%	0,44	376,37	376,91	-0,54	-0,63	10,15	10,15	10,15	10,15	4,95	4,96	4,95	4,95
				B	100%	4%	31,8%	377,00	31,19	25,42	7,42	32,06%	0,26	375,01	375,35	-0,34	-1,99	10,15	10,14	10,15	10,15	4,94	4,94	4,94	4,94
				C	100%	4%	31,8%	377,00	30,04	24,65	7,86	32,10%	0,30	375,88	376,17	-0,29	-1,12	10,14	10,14	10,14	10,14	4,94	4,94	4,94	4,94
			112	A	100%	4%	31,8%	377,00	33,36	27,10	7,60	32,10%	0,30	376,10	375,31	0,79	-0,90	10,15	10,15	10,15	10,15	4,97	4,97	4,97	4,97
				B	100%	4%	31,8%	377,00	33,36	27,11	7,61	32,05%	0,25	378,66	377,80	0,86	1,66	10,12	10,13	10,13	10,13	4,96	4,95	4,96	4,96
				C	100%	4%	31,8%	377,00	32,71	26,64	7,62	31,91%	0,11	377,07	376,44	0,63	0,07	10,15	10,15	10,15	10,15	4,95	4,95	4,95	4,95
				A	100%	4%	31,8%	377,00	33,63	27,19	7,44	32,61%	0,81	376,56	375,27	1,29	-0,44	10,15	10,15	10,15	10,15	4,95	4,95	4,95	4,95
				B	100%	4%	31,8%	377,00	32,17	26,24	7,68	31,95%	0,15	377,22	376,09	1,13	0,22	10,13	10,13	10,13	10,13	4,95	4,95	4,95	4,95
				C	100%	4%	31,8%	377,00	33,28	27,04	7,64	32,16%	0,36	377,13	376,35	0,78	0,13	10,14	10,16	10,16	10,15	4,97	4,97	4,97	4,97

Tabela A.20 (continuação) – Dados gerais dos corpos-de-prova do solo secundário com dolomítica contaminados com fertilizante 10-20-10

A (m <sup>2</sup> )	Vol (cm <sup>3</sup> )	γ <sub>n</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Wágua (g)	Wsolo (g)	Wcal (g)	Volume água (cm <sup>3</sup> )	Volume solo (cm <sup>3</sup> )	Volume Cal (cm <sup>3</sup> )	Volume Vazios (cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (calculado)	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)	Anel 10 kN		RCS (kPa)	Média	Idade	Cont	Cal	Solo
															Leitura	Carga (kN)						
0,00192	195,12	1,93	2,86	1,46	90,97	274,36	10,97	90,97	95,43	4,22	95,46	0,96	48,93	95,29	366	0,682	355,6525	348,9114	7	D1	D	E
0,00191	193,37	1,95	2,86	1,48	91,19	274,80	10,99	91,19	95,58	4,23	93,56	0,94	48,38	97,47	342	0,638	333,9907					
0,00192	194,54	1,93	2,86	1,46	91,54	273,08	10,92	91,54	94,98	4,20	95,35	0,96	49,02	96,00	367,5	0,684	357,0908					
0,00192	195,18	1,92	2,86	1,46	91,06	273,58	10,94	91,06	95,16	4,21	95,81	0,96	49,09	95,04	374,2	0,697	363,5152	361,1489	14	D1	D	E
0,00192	194,80	1,93	2,86	1,46	92,18	272,91	10,92	92,18	94,93	4,20	95,68	0,97	49,12	96,35	368,5	0,686	357,5670					
0,00192	194,35	1,93	2,86	1,46	91,19	273,33	10,93	91,19	95,07	4,21	95,07	0,96	48,92	95,91	373	0,695	362,3645					
0,00192	195,71	1,92	2,86	1,45	91,56	273,08	10,92	91,56	94,99	4,20	96,52	0,97	49,32	94,87	374,5	0,697	362,8229	366,2170	28	D1	D	E
0,00192	194,35	1,93	2,86	1,46	90,99	273,04	10,92	90,99	94,97	4,20	95,18	0,96	48,97	95,60	377,5	0,703	366,6794					
0,00191	193,30	1,94	2,86	1,47	91,01	272,81	10,91	91,01	94,89	4,20	94,21	0,95	48,74	96,60	378	0,704	369,1489					
0,00193	195,59	1,92	2,86	1,46	91,75	273,67	10,95	91,75	95,19	4,21	96,19	0,97	49,18	95,38	385	0,717	371,8608	373,2008	56	D1	D	E
0,00192	194,48	1,93	2,86	1,46	91,03	273,06	10,92	91,03	94,98	4,20	95,30	0,96	49,00	95,52	394	0,733	382,5006					
0,00192	194,35	1,93	2,86	1,46	91,34	273,59	10,94	91,34	95,16	4,21	94,98	0,96	48,87	96,17	376	0,700	365,2411					
0,00194	196,91	1,91	2,86	1,45	91,40	273,75	10,95	91,40	95,22	4,21	97,48	0,98	49,50	93,76	377	0,702	361,7924	372,6270	112	D1	D	E
0,00193	195,41	1,94	2,86	1,47	91,91	275,72	11,03	91,91	95,90	4,24	95,26	0,95	48,75	96,48	404	0,751	389,4568					
0,00192	195,33	1,93	2,86	1,46	91,22	274,85	10,99	91,22	95,60	4,23	95,50	0,96	48,89	95,52	379	0,706	366,6319					
0,00192	195,33	1,93	2,86	1,45	92,59	273,04	10,92	92,59	94,97	4,20	96,16	0,97	49,23	96,30	387	0,720	374,2718	377,6550	112	D1	D	E
0,00192	194,94	1,94	2,86	1,47	91,34	274,88	11,00	91,34	95,61	4,23	95,10	0,95	48,78	96,04	397,8	0,740	384,5856					
0,00194	196,98	1,91	2,86	1,45	91,78	274,37	10,97	91,78	95,43	4,22	97,32	0,98	49,41	94,31	390	0,726	374,1075					