

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO  
SEDIMENTAR ARENOSO DO URUGUAI  
COM CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL**

**Leonardo Behak**

Porto Alegre  
Março de 2007

**Leonardo Behak**

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO  
SEDIMENTAR ARENOSO DO URUGUAI  
COM CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL**

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

Porto Alegre  
Março de 2007

**Leonardo Behak**

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO  
SEDIMENTAR ARENOSO DO URUGUAI  
COM CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL**

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

Porto Alegre, 26 de março de 2007

Prof. Washington Peres Núñez  
DSc. pela Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Brasil  
Orientador

**BANCA EXAMINADORA**

**Jorge Augusto Pereira Ceratti**  
DSc. pela Coordenação de Programas de Pós-Graduação em  
Engenharia da Universidade Federal de Rio de Janeiro  
(COPPE/UFRJ), Brasil

**Pedro Domingos Marques Prietto**  
Dr. em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal de Rio Grande do Sul  
(PPGEC/UFRGS), Brasil

**Rinaldo José Barbosa Pinheiro**  
Dr. em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal de Rio Grande do Sul  
(PPGEC/UFRGS), Brasil

*Com grande amor dedico esta dissertação  
A minha companheira Beatriz  
A meus filhos Santiago e Fernando  
A minha mãe  
Em memória de meu pai, meu melhor professor*

*“Sean los Orientales tan ilustrados como valientes”  
José Gervasio Artigas*

## AGRADECIMENTOS

Desejo externar meus sinceros agradecimentos a todas aquelas pessoas e instituições que de uma ou outra forma fizeram possível esta dissertação, especialmente às seguintes:

A meu amigo e orientador Prof. Washington Peres Núñez, que permitiu com sua iniciativa que pudera fazer o mestrado. Em seu nome a sua família, Sandra e Jean Jaques, pela hospitalidade com que me receberam.

Ao Prof. Jorge A. Ceratti, pela atenção permanente e seu fundamental apoio quando morei em Porto Alegre.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao chefe do Departamento de Geotécnica, meu amigo Prof. Álvaro Rostan, por seu incentivo, sua ajuda constante, seus conselhos e ensinamentos. A meus amigos e colegas do Departamento de Geotécnica Marcos Musso, Adriana Mezzano, Sergio de Souza por cobrir minhas horas de ausência, por seus conselhos.

Aos assistentes de laboratório do Departamento de Geotécnica Juan Alvez e María Elena Bouvier por sua colaboração na realização dos ensaios.

A ARROZUR S.A., e em seu nome à Eng<sup>a</sup>. Dolores Fuentes, por ceder a casca de arroz e a cinza de casca de arroz residual utilizadas nesta pesquisa.

Ao Prof. Álvaro Mombrú, chefe do Laboratorio de Cristalografía, Estado Sólido y Materiales da Facultad de Química, Universidad de la República, por realizar boa parte dos ensaios difratométricos de raios-X, de graça, e colaborar na sua interpretação.

À Prof.<sup>a</sup> Maria Teresa Derrégibus, do Instituto de Ingeniería Química da Facultad de Ingeniería, Universidad de la República pela realização, de graça, das análises químicas das cinzas de casca de arroz e da cal.

Ao Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial da Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, por ceder a mufla para a incineração da casca de arroz.

A minha esposa Beatriz pelo seu amor, seu permanente apoio, compreensão e sacrifício. A meus filhos Santiago e Fernando por suportar a ausência de seu pai durante seis largos meses, por adiar as horas de brincar.

A minha mãe pela sua eterna dedicação, pelos ensinamentos.

A meu irmão Ruben que facilitou o acesso ao Laboratorio de Cristalografía, Estado Sólido y Materiales da Facultad de Química, Universidad de la República.

Aos amigos e colegas da Geotecnia: Jose Rojas, Júlio César Balbinot, Vinicius Peraça, Luizmar Lopez Junior, Leandro Maia, Jucelia Bidim, Marcela Zuchetti, Rodrigo Malysz, Lélío Brito, Klaus Theisen, Francisco Dalla Rossa, Álvaro Pereira pelo companheirismo e compreensão demonstrados em todo momento.

## RESUMO

BEHAK, L. **Estabilização de um Solo Sedimentar Arenoso do Uruguai com Cinza de Casca de Arroz e Cal.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A pesquisa relatada nesta dissertação teve por objetivo analisar a viabilidade técnica de estabilizar-se um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz (CCA) e cal. O solo utilizado apresenta baixo poder suporte, sendo pouco adequado para camadas de sub-base e base de pavimento rodoviário. Também não é adequado para ser estabilizado com cal e sua estabilização com cimento é muito custosa. Dois tipos básicos de CCA foram utilizados: uma cinza residual do processo de queima de casca de arroz em um forno sem controle de temperatura, e cinzas produzidas em laboratório por incineração de casca de arroz a diferentes temperaturas controladas. Foram realizados ensaios de difratogramas de raios-X, compactação, capacidade de suporte (ISC), compressão simples, tração por compressão diametral e durabilidade do solo, das CCA e das misturas solo-CCA-cal. Determinaram-se as influências do tempo de cura, dos teores de CCA e cal e dos tipos de CCA nos parâmetros de compactação, no ISC, no comportamento tensão-deformação e nas resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral. Analisaram-se os efeitos da demora entre mistura e compactação no comportamento tensão-deformação e na resistência à compressão simples nas misturas com CCA residual e cal, além da sua durabilidade a ciclos de molhagem e secagem. As CCA produzidas a temperatura controlada entre 650°C e 800°C mostraram uma maior atividade pozolânica devido a sua estrutura amorfa. Os valores máximos de módulo de deformabilidade e resistência à compressão simples foram obtidos para as misturas com CCA a temperatura controlada. As misturas solo-CCA residual-cal desenvolveram resistência à tração demonstrando a ocorrência de reações pozolânicas. A estabilização do solo sedimentar arenoso com CCA e cal mostrou-se eficaz, permitindo o uso destes materiais em camadas de sub-base de pavimentos.

Palavras-chave: estabilização de solos; cinza de casca de arroz; pavimentos.

## ABSTRACT

This MSc thesis was carried out with the purpose of analysing the technical feasibility of stabilizing a Uruguayan sandy soil with rice husk ash (RHA) and lime. The soil utilized present low bearing capacity and is not suitable for road pavement bases and sub-bases. It does not react to lime by itself and its stabilization with Portland cement is prohibitively expensive. Two kinds of RHA were used: a residual ash produced in the process of incinerating rice husk in an oven without temperature control, and ashes produced in laboratory by incineration of rice husk at different controlled temperatures. X-ray diffraction, compaction and bearing capacity (CBR), unconfined compression, split tensile and durability tests were carried out in the soil and in RHA samples and also in soil-RHA-lime mixtures. The influence of curing time, RHA and lime contents and RHA types in compaction parameters, CBR, strain-stress behaviour and unconfined compressive and split tensile strength were evaluated. The effects of the compaction delay on the stress-strain behaviour and the unconfined compression strength of the mixtures with residual RHA and lime were analysed. In order to investigate the mixtures durability, compacted specimens were submitted to wetting and drying cycles. Due to this amorphous structure, the RHA produced at controlled temperatures (650°C to 800°C) showed to be a more reactive concerning pozzolanic activity. The highest strain modulus and unconfined compression strength values were obtained for the mixtures with controlled temperature RHA. The soil-residual RHA-lime mixtures also developed tensile strength proving that pozzolanic took place. The stabilization of the sandy sedimentary soil with RHA and lime proved to be efficient, allowing the use of these materials in pavement sub-base layers.

Key-words: soil stabilization; rice husk ash, pavements.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE QUADROS.....	xviii
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	6
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL.....	8
2.1.1 A Cal.....	8
2.1.2 As Reações Solo – Cal.....	9
2.1.3 Solos Adequados para a Estabilização com Cal.....	15
2.1.4 Alterações nas Propriedades mecânicas de Solos com Adição de Cal.....	17
2.1.4.1 Plasticidade.....	17
2.1.4.2 Características de Compactação.....	18
2.1.4.3 Comportamento Tensão-Deformação.....	20
2.1.4.4 Resistência.....	21
2.1.4.5 Durabilidade.....	25
2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL.....	27
2.2.1 Breve Histórico do Uso da Cinza de Casca de Arroz na Engenharia Civil....	27
2.2.2 A Casca de Arroz e a Cinza de Casca de Arroz.....	29

2.2.3	Temperatura de Incineração da Casca de Arroz.....	30
2.2.4	Solos Adequados para a Estabilização com Cinza de Casca de Arroz e Cal.....	32
2.2.5	Efeitos da Estabilização com Cinza de Casca de Arroz e Cal nas Propriedades dos Solos.....	35
2.2.5.1	Plasticidade.....	35
2.2.5.2	Características de Compactação.....	37
2.2.5.3	Comportamento Tensão-Deformação.....	37
2.2.5.4	Resistência.....	38
2.2.5.5	Durabilidade.....	41
2.2.6	Comentário final.....	42
3	METODO E MATERIAS UTILIZADOS.....	44
3.1	METODO.....	44
3.1.1	Preparação da cinza de casca de arroz a temperatura controlada.....	46
3.1.2	Dosagem e Mistura.....	47
3.1.3	Densidade real dos grãos.....	48
3.1.4	Análise Granulométrica.....	49
3.1.5	Limites de Atterberg.....	49
3.1.6	Ensaio de Compactação.....	49
3.1.7	Ensaio de Difractometria de Raios-X.....	50
3.1.8	Análise química.....	51
3.1.9	Ensaio de compressão simples.....	51
3.1.10	Ensaio de tração por compressão diametral.....	52
3.1.11	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia.....	54
3.1.12	Ensaio de Durabilidade.....	54
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS.....	55

3.2.1 Casca de Arroz e Cinza de Casca de Arroz Residual.....	55
3.2.2 Solo.....	61
3.2.3 Cal.....	68
3.2.4 Água.....	69
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	70
4.1 DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X DAS MISTURAS SOLO-CCA-CAL.....	70
4.2 CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO.....	77
4.3 CAPACIDADE DE SUPORTE.....	79
4.4 COMPORTAMENTO TENSÃO – DEFORMAÇÃO.....	81
4.4.1 Influência do tempo de cura.....	81
4.4.2 Influência dos teores de CCAr e cal.....	86
4.4.3 Influência do tempo de espera entre mistura e compactação.....	88
4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	90
4.5.1 Influência do tempo de cura.....	91
4.5.2 Influência dos teores de CCAr e cal.....	93
4.5.3 Influência do tempo de espera entre mistura e compactação.....	96
4.6 RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E O MÓDULO DE DEFORMABILIDADE SECANTE.....	98
4.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	100
4.8 RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SIMPLES E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	104
4.9 DURABILIDADE.....	105
5 CARACTERÍSTICAS DAS CCA INCINERADAS A TEMPERATURA CONTROLADA E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DAS MISTURAS SOLO-CCA-CAL.....	109
5.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE INCINERAÇÃO NAS CCA.....	109

5.2 DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X DAS MISTURAS COM CCA A TEMPERATURA CONTROLADA E CAL.....	117
5.3 COMPORTAMENTO TENSÃO – DEFORMAÇÃO.....	123
5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	127
5.5 RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E O MÓDULO DE DEFORMABILIDADE SECANTE.....	129
5.6 SÍNTEZE DO CAPÍTULO.....	131
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	133
6.1 CONCLUSÕES.....	133
6.1.1 Com relação aos materiais empregados.....	133
6.1.2 Com relação à mineralogia e propriedades mecânicas das misturas com cinza de casca de arroz residual.....	133
6.1.3 Com relação à mineralogia e propriedades mecânicas das misturas com cinza de casca de arroz incinerada a temperatura controlada.....	137
6.1.4 Conclusão global.....	138
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mecanismo de troca de cátions.....	10
Figura 2.2 - Mecanismo de estabilização com cal de solos argilosos.....	12
Figura 3.1 - Mufla para a incineração da casca de arroz a temperaturas controladas.....	46
Figura 3.2 - Vista da mufla durante a incineração da casca de arroz.....	47
Figura 3.3 - Prensa para os ensaios de compressão simples e tração por compressão. À direita, detalhe do suporte para o ensaio de tração por compressão diametral.....	53
Figura 3.4 - Dispositivo para processar os ciclos de molhagem e secagem do ensaio de durabilidade. Observam-se os corpos-de-prova.....	55
Figura 3.5 - Áreas de cultivo de arroz em Uruguai e localização da bacia arrozeira da Lagoa Mirim e da localidade de Villa Sara (Fonte: ACA, 2006).....	56
Figura 3.6 - Pilhas de Cinza de Casca de Arroz obtidas da queima de casca de arroz do forno de ARROZUR.....	57
Figura 3.7 – Distribuição granulométrica da casca de arroz e da CCAr.....	58
Figura 3.8 - Difratoograma de raios-X da amostra de cinza de casca de arroz residual de ARROZUR na condição natural.....	60
Figura 3.9 - Plano de localização da Jazida Pérez Bustos.....	61
Figura 3.10 - Perfil da frente da Jazida Pérez Bustos.....	62
Figura 3.11 - Solo coletado na Jazida Pérez Busto.....	62
Figura 3.12 - Distribuição granulométrica do solo.....	63
Figura 3.13 - Difratoograma de raios-X do solo na condição natural.....	64
Figura 3.14 - Curvas de compactação do solo.....	65
Figura 3.15 - Curvas do ensaio de ISC do solo.....	66
Figura 3.16 - Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à compressão simples de três corpos-de-prova do solo.....	67

Figura 3.17 – Distribuição granulométrica da cal.....	68
Figura 4.1 - Difratoograma de raios-X da amostra da mistura solo-15%CCAr-5%Cal curada 28 dias, do solo e da cinza de casca de arroz residual.....	73
Figura 4.2 - Difratoograma de raios-X da amostra da mistura solo-20%CCAr-5%Cal curada 28 dias, do solo e da cinza de casca de arroz residual.....	74
Figura 4.3 - Difratoograma de raios-X da amostra da mistura solo-20%CCAr-10%Cal curada 28 dias, do solo e da cinza de casca de arroz residual.....	75
Figura 4.4 - Difratoogramas de raios-X das misturas de solo-CCAr-Cal com 28 dias de cura, do solo e da cinza de casca de arroz residual.....	76
Figura 4.5 - Curvas de compactação da mistura solo-20%CCAr-10%Cal à energia normal e do solo às energias normal e modificada.....	78
Figura 4.6 – Curvas de ISC da mistura solo-20%CCAr-10%Cal e do solo.....	80
Figura 4.7 - Curvas tensão-deformação das misturas solo-15%CCAr-5%Cal para diferentes tempos de cura.....	82
Figura 4.8 - Curva tensão-deformação das misturas solo-20%CCAr-5%Cal para diferentes tempos de cura.....	83
Figura 4.9 – Curvas tensão-deformação das misturas solo-20%CCAr-10%Cal para diferentes tempos de cura.....	84
Figura 4.10 – Evolução do Módulo secante com o tempo de cura das misturas solo-CCAr-cal.....	85
Figura 4.11 - Evolução do Módulo secante com os teores de CCAr e cal das misturas para 7, 14, 28 e 56 dias de cura.....	87
Figura 4.12 – Evolução do módulo secante da mistura solo-20%CCAr-10%cal com 28 dias de cura em função do tempo de espera entre a mistura e a compactação.....	89
Figura 4.13 – Corpo-de-prova de mistura solo-CCAr-cal para o ensaio de resistência à compressão simples.....	90
Figura 4.14 - Evolução da RCS com o tempo de cura das misturas solo-CCAr-cal.....	92

Figura 4.15 - Evolução da RCS com os teores de CCAr e cal das misturas para 7, 14, 28 e 56 dias de cura.....	93
Figura 4.16 - Evolução da RCS da mistura solo-20%CCAr-10%cal com 28 dias de cura em função do tempo de espera entre a mistura e a compactação a energia normal.....	97
Figura 4.17 - Relação entre o módulo de deformabilidade secante e a RCS para cada mistura solo-CCAr-cal ensaiada à compressão simples.....	98
Figura 4.18 - Relação entre o módulo de deformabilidade secante e a RCS para todas as mistura solo-CCAr-cal e todos os tempos de cura.....	99
Figura 4.19 – Tipo de ruptura apresentada nas misturas solo-CCAr-cal no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	100
Figura 4.20 – Evolução da RCD com o tempo de cura para diferentes misturas solo-CCAr-cal.....	101
Figura 4.21 - Evolução da RCD com os teores de CCAr e cal das misturas para 7, 14, 28 e 56 dias de cura.....	103
Figura 4.22 - Relação entre a RCS e a RCD das mistura solo-CCAr-cal.....	105
Figura 4.23 – Estado das amostras imediatamente antes de ser ensaiadas. Esquerda: amostra não submetida a ciclos. Direita: amostra submetida a ciclos.....	106
Figura 4.24 – Ruptura frágil apresentada na amostra submetida a ciclos de molhagem e secagem.....	107
Figura 5.1 - Casca de arroz e da cinza de casca de arroz antes e depois da incineração na mufla. Esquerda: casca de arroz. Direita: cinza de casca de arroz.....	109
Figura 5.2 - Razão de pesos cinza de casca de arroz – casca de arroz em função da temperatura de incineração da casca de arroz.....	110
Figura 5.3 – Aparências das cinzas incineradas a diferentes temperaturas controladas. Acima à esquerda: CCA à temperatura de 500°C. Acima à direita: CCA à temperatura de 650°C. Abaixo à esquerda: CCA à temperatura de 800°C. Abaixo à direita: CCA à temperatura de 900°C.....	111
Figura 5.4 - Difrátogramas de raios-X das amostras das cinzas de casca de arroz incineradas a temperaturas controladas e da cinza de casca de arroz residual.....	113

Figura 5.5 - Difractogramas de raios-X das CCA <sub>TC</sub> e da CCA <sub>r</sub> com as mostras da CCA <sub>TC650</sub> , CCA <sub>TC800</sub> e CCA <sub>TC900</sub> deslocadas no eixo das intensidades.....	114
Figura 5.6 – Evolução das perdas de matéria orgânica por calcinação com a temperatura de incineração para as CCA a temperatura controlada.....	116
Figura 5.7 - Difractograma de raios-X da amostra da mistura solo-15%CCA <sub>TC650</sub> -5%Cal curada 28 dias, da CCA <sub>TC650</sub> e do solo.....	119
Figura 5.8 - Difractograma de raios-X da amostra da mistura solo-15%CCA <sub>TC800</sub> -5%Cal curada 28 dias, do solo e da CCA <sub>TC800</sub> .....	120
Figura 5.9 - Difractogramas de raios-X das misturas realizadas com as cinzas de casca de arroz a temperaturas controladas de 650°C e 800°C.....	121
Figura 5.10 - Difractogramas de raios-X de todas as misturas solo-CCA-cal.....	122
Figura 5.11 - Curvas tensão-deformação das misturas solo-CCA <sub>TC</sub> -cal e solo-CCA <sub>r</sub> -cal ensaiadas a compressão simples após de 28 dias de cura.....	124
Figura 5.12 – Ruptura frágil do corpo-de-prova da mistura solo-15%CCA <sub>TC650</sub> -5%Cal submetido à compressão simples.....	125
Figura 5.13 – Módulos secantes em função do tipo de CCA, do tempo de cura e dos teores de CCA e cal.....	126
Figura 5.14 – Corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão simples. Esquerda: mistura solo-CCA <sub>r</sub> -cal. Centro: mistura solo-CCA <sub>TC650</sub> -cal. Direita: mistura solo-CCA <sub>TC800</sub> -cal.....	127
Figura 5.15 - RCS em função do tipo de CCA, do tempo de cura e dos teores de CCA e cal.....	128
Figura 5.16 - Relação entre o módulo de deformabilidade secante e a RCS para todas as mistura de solo com cal e CCA residual e incinerada a temperatura controlada.....	130

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química de várias cinzas de casca de arroz.....	30
Tabela 2.2 – Composição química da cinza de casca de arroz incinerada a céu aberto..	30
Tabela 4.1 – Parâmetros ótimos de compactação da mistura solo-CCAr-cal.....	78
Tabela 4.2 – ISC correspondentes aos parâmetros ótimos de compactação da mistura solo-20%CCAr-10%Cal e o solo.....	80
Tabela 4.3 – Módulo secante médio para as diferentes misturas solo-CCAr-cal e tempos de cura.....	84
Tabela 4. 4 – Efeito da demora na compactação no $E_{0,75\sigma_{rup}}$ da mistura solo-20%CCAr-10%Cal com 28 dias de cura.....	88
Tabela 4. 5 – Resistência à compressão simples (RCS) média para as diferentes misturas solo-CCAr-cal e tempos de cura.....	91
Tabela 4. 6 - Efeito da demora na compactação na RCS da mistura solo-20%CCAr-10%Cal com 28 dias de cura.....	96
Tabela 4.7 – Valores médios de RCD para diferentes misturas solo-CCAr-cal e tempos de cura.....	101
Tabela 4.8 – Pesos específicos secos médios dos corpos-de-prova das mistura solo-CCAr-cal ensaiados à RCD após de diferentes tempos de cura.....	104
Tabela 4.9 – RCS médias das amostras submetidas e não submetidas a ciclos de molhagem e secagem e influência dos ciclos na RCS.....	107
Tabela 5.1 - Pesos da casca de arroz e da cinza da casca de arroz antes e depois de cada turno para diferentes temperaturas de incineração.....	110
Tabela 5.2 - Perdas de matéria orgânica por calcinação das cinza da casca de arroz a temperatura controlada e residual.....	115
Tabela 5.3 – Valores de $E_{0,75\sigma_{rup}}$ do solo natural, das misturas solo-CCAr-cal para 28 e 56 dias de cura e das misturas solo-CCATC-cal para 28 dias de cura.....	125

Tabela 5.4 – Valores médios de RCS do solo estabilizado com cal e CCA incineradas a temperaturas controladas após 28 dias de cura.....	128
--	-----

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1.1 - Evolução de cultivo de arroz em Uruguai (fonte: ACA, 2006).....	3
Quadro 3.1 – Perdas de matéria orgânica por calcinação da cinza da casca de arroz residual coletada em ARROZUR.....	59
Quadro 3.2 – Resistência à compressão simples e módulo secante do solo.....	67

**LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS**

ACA	Asociación de Cultivadores de Arroz (Uruguai)
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
c	Coesão aparente
CAH	Aluminato hidratado de cálcio
CASH	Sílico-aluminato hidratado de cálcio
CCA	Cinza de casca de arroz
CCAr	Cinza de casca de arroz residual
CCA <sub>TC</sub>	Cinza de casca de arroz a temperatura controlada
CCA <sub>TC500</sub>	Cinza de casca de arroz incinerada a 500°C
CCA <sub>TC650</sub>	Cinza de casca de arroz incinerada a 650°C
CCA <sub>TC800</sub>	Cinza de casca de arroz incinerada a 800°C
CCA <sub>TC900</sub>	Cinza de casca de arroz incinerada a 900°C
CPT	Ensaio de Penetração de Cone
CSH	Silicato hidratado de cálcio
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
E	Módulo de Elasticidade longitudinal na compressão
E <sub>u</sub>	Módulo de Elasticidade Tangente Não Drenado
E <sub>0,75σ<sub>rup</sub></sub>	Módulo de Deformabilidade Secante
G	Densidade Real dos Grãos
IAS	Índice de Atividade da Sílica
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia

$k_i$	Relação molecular sílica/alumina
$k_r$	Relação molecular sílica/sexquióxidos
LC	Limite de Contração
LFP	Lime Fixation Point
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NLA	National Lime Association (Estados Unidos de América)
OEC	Teor ótimo de estabilização com cal
pH	Potencial hidrogeniônico
$Q_r$	Quociente de Resistência
$q_u$	Resistência Última
$R^2$	Coefficiente de Determinação
RCD	Resistência à Tração por Compressão Diametral
RCS	Resistência à Compressão Simples
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
T	Temperatura
TRB	Transportation Research Board
$\epsilon_r$	Deformação axial unitária na Ruptura
$\gamma_d$	Peso específico seco
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso específico seco máximo
$\sigma_{rup}$	Tensão Normal de Ruptura
$\phi$	Ângulo de atrito interno
$\omega_{\acute{o}t}$	Teor de umidade ótimo
$2\theta$	Ângulo de Difração

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O solo natural é um material complexo e variável, porém sendo muito abundante e de baixo custo, oferece grandes oportunidades de emprego na engenharia civil. Particularmente, nas obras de pavimentação os solos constituem o subleito, são os materiais freqüentemente empregados para a construção das camadas de base e sub-base. Entretanto, nem sempre os solos locais satisfazem às exigências impostas pelas cargas de tráfego e as condições ambientais para sua utilização. Nestes casos, deve-se optar por soluções alternativas tais como: dimensionar os pavimentos considerando as limitações do solo; substituir o material existente por outro de melhor qualidade; ou alterar suas propriedades, criando um novo material que atenda as necessidades do projeto. Esta última alternativa é chamada de estabilização de solos (Núñez, 1991).

Mais um aspecto a ser considerado na escolha de alguma das alternativas de solução será a oportunidade econômica de seu emprego, ainda mais quando se trata de pavimentos de baixo volume de tráfego, onde as restrições orçamentárias são as que impõem a solução. A utilização de materiais granulares, adequados mecanicamente mas extraídos de sítios distantes das obras, resulta em grandes distâncias de transporte, tornando sua utilização inviável do ponto de vista econômico.

Nas regiões onde a utilização extensiva de britas conduziu a sua escassez, elevando seus custos, a estabilização de solos locais de menor qualidade surge como uma boa alternativa nas obras de pavimentação. Também, a utilização da estabilização vem evoluindo naquelas regiões onde existem grandes limitações ambientais para a deposição de solos residuais da mineração ou outros processos.

A estabilização de solos resulta em pavimentos de bom desempenho e durabilidade. Existem várias técnicas de estabilização, as que se podem dividir em métodos mecânicos (compactação, correção granulométrica) e métodos físico-químicos, através da utilização de aditivos. A cal e o cimento Portland são os dois agentes estabilizadores de solos mais amplamente empregados.

O uso da cal como estabilizante de solos coesivos data de há mais de 2000 anos. Existe evidência da utilização desta técnica na construção da Via Apia, na antiga Roma (Lambe, 1962). Mais recentemente, o emprego em rodovias se iniciou nos Estados Unidos na década dos anos 20 do passado século. Atualmente, o melhoramento de subleitos e a utilização de bases e/ou sub-bases de solo-cal é uma solução de baixo custo em rodovias em construção ou em recuperação.

Nas últimas décadas existe um crescente interesse na utilização ou reutilização, em obras de engenharia, de diversos resíduos de processos produtivos industriais e agroindustriais. O crescimento da produção industrial incrementa a geração de resíduos, fazendo mais difícil, custoso e ambientalmente insustentável seu tratamento e deposição final. A possível reutilização parcial ou total de alguns deles ocasionará benefícios econômicos e ambientais para o conjunto da sociedade.

Particularmente, têm-se desenvolvido pesquisas e aplicações para reutilizar os subprodutos residuais como aditivos estabilizantes de solos, onde o baixo custo é mais uma vantagem do seu uso. Portanto, resultando em soluções técnica, econômica e ambientalmente ótimas. Destacam-se neste campo as escórias de aciaria e as cinzas.

As cinzas originadas em diferentes processos industriais e agroindustriais têm tido atenção especial como aditivos para estabilização de solos. As cinzas volantes (“fly ash”), geralmente produzidas em termelétricas que queimam carvão ou matéria orgânica, são as pozolanas artificiais mais comumente empregada nos Estados Unidos e Europa. No Brasil, o primeiro registro remonta a 1964, quando cinza volante foi incorporada ao concreto, na construção da hidrelétrica de Jupia.

As pesquisas sobre o emprego de cinzas volantes na pavimentação iniciaram-se no Brasil em 1969 (Marcon, 1977), ano em que foi assinado o convênio COPPE/IPR para desenvolver estudos laboratoriais de mistura areia-cinza-cal. No Rio Grande do Sul (RS) as pesquisas iniciam com a dissertação de mestrado de Ceratti (1979), na qual se estabilizou um solo residual com cinza e cal.

A casca de arroz é o mais abundante entre os subprodutos resultantes da produção agrícola de grãos e sua deposição final é um dos maiores problemas existentes nos países produtores de arroz. Segundo Velupillai *et al.* (1996), mais de 100 milhões de toneladas de casca de arroz são geradas a cada ano no mundo. Os mesmos autores

assinalam que, no ano 1996, nos Estados Unidos, foram produzidas 1.260.000 toneladas de casca de arroz nos estados de Louisiana, Texas, Arkansas, Missouri, Mississippi, Florida e Califórnia.

No Brasil, a produção de arroz tem-se mantido próxima a 10 milhões de toneladas, sendo o Estado de Rio Grande do Sul o maior produtor nacional com uma participação que atingiu o 49,5% do total, ou seja, 5.146.595 ton. A produção de casca de arroz é mais que significativa.

A produção de arroz no Uruguai tem evoluído nas últimas décadas, passando de 391.188 ton na safra 1987/88 para 1.214.490 ton na safra 2004/05, segundo dados da Asociación de Cultivadores de Arroz (ACA, 2006), mostrados no Quadro 1.1.

Quadro 1.1 - Evolução de cultivo de arroz no Uruguai

(fonte: ACA, 2006)

SAFRA	SUPERFÍCIE PLANTADA (hectares)	PRODUÇÃO ARROZ COM CASCA (ton)
1987/88	81.237	391.188
1988/89	97.178	535.394
1989/90	82.522	365.407
1990/91	109.794	522.097
1991/92	127.268	618.708
1992/93	135.739	699.294
1993/94	134.332	625.238
1994/95	146.268	808.344
1995/96	150.941	972.062
1996/97	155.492	1.037.132
1997/98	180.229	949.808
1998/99	205.990	1.301.859
1999/00	185.000	1.221.000
2000/01	153.676	1.030.198
2001/02	157.235	855.571
2002/03	152.203	875.167
2003/04	195.641	1.320.576
2004/05	184.023	1.214.490

Ali *et al.* (1992) afirmam que de cada 4 ton de arroz produzidas, 1 ton é casca de arroz, ou seja 25% em peso da produção total de arroz. Levando em conta esta afirmação e considerando os dados do Quadro 1.1, teriam sido produzidas no Uruguai aproximadamente 3.800.000 ton de casca de arroz entre os anos 1987 e 2005. Só na safra 2004/05, pode-se avaliar em 300.000 ton a produção total de casca de arroz. A deposição final de tais quantidades de casca é um autêntico problema sem solução definitiva ainda.

Em muitas regiões do planeta, a casca de arroz é queimada, produzindo cinza, com o objetivo de reduzir o volume de resíduo a depositar. Também, tem-se procurado dar uma utilidade econômica à queima da casca de arroz, por exemplo, o emprego energético em caldeiras de secagem do próprio arroz (processo de parboilização) e como combustível para a produção de cimento Portland ou geração de energia elétrica.

Tem sido relatado que a casca de arroz produz aproximadamente 20% em peso de cinza, quando incinerada (Juliano, 1985). Considerando este fato e a partir dos dados da ACA (2006), conclui-se que na safra de arroz 2004-2005 no Uruguai teriam sido geradas 60.700 ton de cinza de casca de arroz, se toda a casca de arroz tivesse sido queimada. As diferentes alternativas de queima da casca de arroz trazem um novo problema, a deposição final da cinza produzida. Problema tanto maior, quando se sabe que o contato com a cinza produz enfermidades tais com a silicose.

Procuram-se alternativas para resolver o problema da deposição final da cinza de casca de arroz (CCA) como resíduo, tais como: seu emprego como pozolana para concretos, ou como agente estabilizante de solos, combinado com cal ou com cimento Portland, para materiais de pavimentos de baixo volume de tráfego. Metha (1975), na University of California, Berkeley, desenvolveu um processo para produzir pozolanas a partir de casca de arroz. O mesmo autor assinala que a pozolana obtida pelo processo é altamente reativa e estruturalmente tão boa quanto o cimento Portland. No Uruguai, Rodríguez (2000) estudou a potencialidade de uso da CCA como aditivo de concretos tradicionais e de alta resistência.

A adição de CCA aos solos apresenta duas vantagens. Permite melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos solos, habilitando seu emprego como materiais para subleitos, sub-bases e bases de pavimentos. É uma solução à deposição final do

subproduto residual. A transformação da CCA em produtos pozolânicos, quando combinada com cal ou cimento e água ou seu encapsulado de forma adequada reduz os efeitos sobre a saúde humana.

As areias e os solos arenosos apresentam baixa atividade pozolânica frente à cal, devido a que são pobres em argilo-minerais e particularmente em sílica, portanto não reagem adequadamente à estabilização com cal. Classicamente são estabilizados com cimento Portland, muitas vezes com alto consumo do estabilizante, implicando altos custos construtivos. Uma alternativa, para substituir o cimento Portland pela cal e reduzir custos, é adicionar a este tipo de solos a sílica necessária para produzir reações pozolânicas com a cal. As CCA são ricas em sílica, sendo composta entre 90 – 96% por este mineral (Juliano, 1985). A estabilização de areias e solos arenosos com CCA e cal resulta uma alternativa técnica e economicamente conveniente.

Geralmente solos bons para a cultura de arroz, são muito ruins como subleito. Como resultado, as rodovias vicinais das regiões orizícolas construídas com estes solos acabam muito deterioradas ao final de cada safra, não proporcionando a trafegabilidade necessária o ano inteiro com conseqüências sócio-econômicas para a população da região. Grandes investimentos devem ser feitos para reabilitar as rodovias vicinais antes de cada safra, de modo de assegurar a trafegabilidade de caminhões pesados durante esta. Muitas vezes estes investimentos são fortemente impedidos pelas restrições orçamentárias. As CCA geralmente são produzidas nas próprias regiões de cultura de arroz com custos muito baixos. A estabilização com CCA de solos de subleitos de rodovias vicinais das regiões nas mesmas regiões onde estas são geradas é uma alternativa muito atrativa, já que traz como resultado uma redução de custos de transporte e de manutenção ao prolongar a vida útil destas rodovias.

Conclui-se que pesquisar a potencialidade de uso deste resíduo, particularmente na melhoria das propriedades mecânicas de solos locais, resulta de interesse por suas vantagens técnicas, econômicas e ambientais, sobretudo visando sua aplicação nas regiões orizícolas.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa é realizar uma abordagem da estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal, visando compreender o comportamento estrutural de pavimentos com camadas com este material.

Particularmente procura-se demonstrar que a estabilização do solo arenoso com cinza de casca de arroz, em conjunto com a cal, produz um material mais resistente e durável e menos deformável que o solo natural, constituindo-se em uma alternativa tecnicamente viável para pavimentação de rodovias em regiões produtoras de arroz; propiciando melhoria significativa na malha viária destas regiões, com reflexos sócio-econômicos. Assim mesmo, seria uma alternativa ambientalmente correta, contribuindo na preservação do meio ambiente, empregando um resíduo abundante e reduzindo-se a exploração de jazidas de recursos não-renováveis, como solos e rochas.

A definição e caracterização do solo são de importância para poder avaliar os efeitos da adição de CCA e a cal sobre os parâmetros físicos e mecânicos mais relevantes.

No Uruguai existe somente um forno industrial, onde a casca de arroz é queimada sem controle de temperatura, resultando uma cinza residual heterogênea em sua composição e estrutura. Porém, é a melhor cinza atualmente disponível para estabilizar solos. Portanto, pesquisou-se a influência de diferentes misturas com esta cinza residual e cal nas seguintes propriedades físicas e mecânicas: composição química e mineralógica, parâmetros ótimos de compactação, capacidade de suporte, comportamento tensão-deformação, resistência à compressão simples e à tração e durabilidade.

Um objetivo particularmente importante é verificar que o controle da temperatura de incineração da casca de arroz produz cinzas mais reativas que as residuais, proporcionando aumentos significativos de resistência e módulo de deformabilidade; definindo a faixa de temperaturas de incineração mais adequada. Portanto, especial atenção é dada na pesquisa à influência da temperatura de incineração da casca de arroz nas características e propriedades das cinzas geradas e nas

propriedades das misturas de solo com estas cinzas e cal. Para isso, cascas de arroz foram incineradas em uma mufla (pequena estufa de uso laboratorial, na qual é possível atingir temperaturas muito elevadas) a diferentes temperaturas controladas.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação se divide em seis capítulos.

No **Capítulo 2** é feita uma revisão de antecedentes de estabilização de solos com cal de solos, visando à compreensão dos fenômenos químicos e físicos da estabilização de solos, as reações solo-cal, as modificações nas propriedades físicas e mecânicas das misturas. Apresenta-se também uma revisão das características das cinzas de casca de arroz, sua composição química e os efeitos da temperatura de incineração das cascas de arroz sobre elas, antecedentes de seu emprego na estabilização de solos para materiais de camadas de pavimentos, os efeitos nas propriedades físicas e mecânicas das misturas.

O **Capítulo 3** apresenta a metodologia empregada para atingir os objetivos propostos, bem como a descrição dos materiais utilizados.

Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais das misturas de solo com cinza de casca de arroz residual do processo de parboilização do arroz e com cal, são apresentados e analisados no **Capítulo 4**. São feitas comparações entre as composições químicas do solo objeto da estabilização, as cinzas residuais e as misturas solo-cinza de casca de arroz residual-cal. Analisam-se as modificações dos parâmetros físicos e mecânicos de diferentes misturas solo-cinza de casca de arroz residual-cal.

O estudo particular dos efeitos da temperatura de incineração da casca de arroz na composição e a estrutura química das cinzas assim produzidas é feito no **Capítulo 5**. Além, analisam-se as modificações dos parâmetros mecânicos de diferentes misturas solo-cinza de casca de arroz a temperatura controlada-cal, comparando-os com as propriedades mecânicas das misturas solo-cinza de casca de arroz residual-cal.

Finalmente, no **Capítulo 6** são apresentadas as conclusões obtidas nesta pesquisa, assim como sugestões para trabalhos futuros vinculados com a temática da pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A estabilização de solos com cinza de casca de arroz (CCA) e cal é uma técnica de aplicação relativamente recente. A necessidade de resolver o problema da deposição dos resíduos da produção de arroz cada vez mais crescente, seja a casca de arroz ou a cinza resultante de sua incineração, levou a tentar utilizar a CCA como agente estabilizante de solos. Sendo assim, não há muitos relatos de estabilização com CCA e cal de solos. Contudo, os mecanismos das reações químicas que se produzem entre a cal e a cinza de casca de arroz, e seus efeitos físicos sobre os solos, são muito similares aos que acontecem entre a cal e os argilo-minerais de solos argilosos. Portanto, faz-se inicialmente uma revisão bibliográfica sobre a estabilização de solos com cal.

Neste Capítulo enfatizam-se os mecanismos de estabilização de solos e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas. Particular atenção é dada à influência da composição e da estrutura química da cinza de casca de arroz, dependente da temperatura de queima, visando à interpretação dos resultados dos ensaios.

### 2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

#### 2.1.1 A Cal

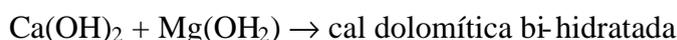
A cal é um aglomerante resultante da calcinação, a temperatura de 850 – 900°C, de rochas calcárias, constituídas por carbonato de cálcio e/ou carbonato de magnésio. O resultado da calcinação é o óxido de cálcio (CaO) e cálcio-magnésio (CaO – MgO), genericamente denominadas de cal viva ou cal virgem.

Quando a cal viva é adicionada água, se produz sua hidratação, obtendo-se como resultado cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>). A hidratação da cal viva é exotérmica, com grande liberação de calor. As reações de formação de cal viva e da cal hidratada são resumidas pelas Equações 2.1 e 2.2.





A Equação 2.1 representa a reação de formação da cal viva pela calcinação de carbonato de cálcio. Enquanto a equação 2.2 mostra a reação de hidratação que forma a chamada cal hidratada cálcica. Além dessa cal, pode-se ter cales dolomíticas, quando o processo de calcinação é a partir de calcário dolomítico (ricos em magnésio). As cales dolomíticas são misturas de óxidos ou hidróxidos de cálcio e de magnésio. Assim se reconhecem os seguintes tipos de cales dolomíticas:



Segundo relato da National Lime Association dos Estados Unidos (NLA, 2004), a cal cálcica pode ter até 5% de óxido ou hidróxido de magnésio. No entanto, os teores de óxido ou hidróxido de magnésio na cal dolomítica oscilam entre 35% e 46%.

Não existem dados confiáveis das características das cales produzidas comercialmente no Uruguai, por ser sua manufatura quase artesanal. Sabe-se que só existem cales cálcicas, já que sua produção é mais barata.

### 2.1.2 As Reações Solo – Cal

Quando se adiciona cal a um solo fino em presença de água, ocorrem quatro reações químicas principais: troca catiônica, floculação-aglomeração, reações pozolânicas, carbonatação (Bhattacharja *et al.*, 2003), que causam modificações ou melhoramentos nas propriedades dos solos (Hilt e Davidson, 1969). A troca catiônica e a floculação-aglomeração são reações de tipo coloidal que iniciam imediatamente após da adição da cal, em presença de água, e que se desenvolvem geralmente em poucos minutos ou horas, constituindo a chamada fase rápida. Estas reações são chamadas de melhoramento ou modificação porque só causam modificações nas propriedades físicas dos solos (plasticidade, textura, trabalhabilidade, estabilidade volumétrica) sem aumento considerável de resistência.

As reações pozolânicas e a carbonatação são dependentes do tempo, ou seja, iniciam-se algumas semanas após da adição da cal, em presença de água, e se desenvolvem durante um longo período de tempo, vários anos em alguns casos. Estas reações ocorrem na chamada fase lenta da estabilização alcalina. As reações pozolânicas causam a formação de produtos cimentantes, responsáveis pelo aumento da resistência e da durabilidade das misturas solo-cal, constituindo a estabilização propriamente dita. A carbonatação é uma reação, geralmente não desejada, já que produz cimentos fracos, prejudiciais ao processo de estabilização.

Devido à deficiência de cargas elétricas dentro da estrutura cristalina dos argilo-minerais, são atraídos cátions às superfícies de clivagem para neutralizar a carga negativa. Em argilas secas, os cátions são adsorvidos na superfície ou permanecem na forma de precipitados. Na presença de água, os cátions são hidratados e, conjuntamente com as moléculas de água, são atraídos à superfície do argilo-mineral, formando a chamada dupla camada difusa. A espessura da dupla camada difusa determina a plasticidade da argila. Quando o cátion responsável pela neutralização é monovalente, tal como o sódio, a argila é plástica (Bhattacharja *et al.*, 2003).

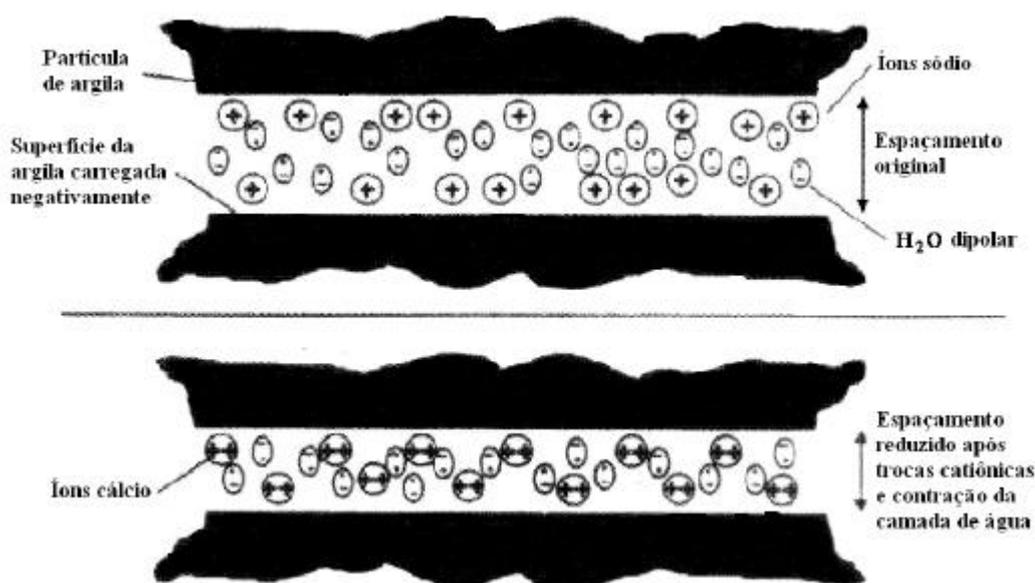


Figura 2.1 – Mecanismo de troca de cátions.

(Fonte: Prusinski e Bhattacharja, 1999)

Os cátions monovalentes adsorvidos na dupla camada difusa podem ser facilmente trocados por cátions bivalentes ou trivalentes, em solução aquosa, sem modificação na estrutura cristalina. Este fenômeno é chamado de troca catiônica e é uma propriedade particular dos argilo-minerais. A troca dos cátions monovalentes pelos cátions bivalentes e trivalentes causa a redução da espessura da dupla camada difusa e, assim, da plasticidade. Prusinski e Bhattacharja (1999) afirmam que a troca catiônica inicia o processo de estabilização muito rapidamente e é seguida pela floculação-aglomeração. A Figura 2.1 esquematiza o mecanismo de troca catiônica.

Assumindo a constância dos outros fatores, a adsorção de cátions trivalentes é preferida sobre os cátions bivalentes, e a de cátions bivalentes são preferidos sobre os cátions monovalentes (Grim, 1962). A série típica em ordem ascendente de preferência de troca é, da direita para esquerda, como segue:  $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{++} < \text{Mg}^{++} < \text{Al}^{+++}$ . Sendo a cal uma fonte de cátions cálcio livre ( $\text{Ca}^{++}$ ), quando adicionada em quantidade suficiente às argilas cria uma concentração de  $\text{Ca}^{++}$ , dissolvidos na água livre do solo, que se fixam na superfície dos argilo-minerais (Joly e Lelong, 2005).

Os cátions polivalentes têm efeito floculante sobre os argilo-minerais negativamente carregados. Herzog e Mitchell (1963) afirmaram que a floculação é causada pelo aumento da concentração eletrolítica da água intersticial e a adsorção de  $\text{Ca}^{++}$  na superfície da argila. O aumento da concentração eletrolítica tem o efeito de reduzir a espessura da dupla camada difusa dos argilo-minerais, com aumento das forças de atração elétrica entre partículas. Como resultado se produz a floculação-aglomeração que causa mudanças aparentes na textura dos argilo-minerais.

As reações pozolânicas são as de maior interesse na fase lenta, por ser a causa do contínuo aumento da resistência mecânica e da durabilidade das misturas solo-cal. Quando uma quantidade suficiente de cal é adicionada a um solo, os íons hidroxila liberados da cal elevam o pH da mistura solo-cal até aproximadamente 12,4 (Rogers e Glendinning, 2000). Este elevado nível de alcalinidade é favorável à dissolução da sílica e da alumina dos argilo-minerais que reagem com os cátions livres de cálcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) e a água (Eades, 1962), formando silicato hidratado de cálcio (CSH), aluminato hidratado de cálcio (CAH) e/ou sílico-aluminato hidratado de cálcio (CASH). Segundo Casanova

(1981), estes géis são composições de tobermorita com a forma de placas irregulares ou lâminas. As reações prosseguiram enquanto houver suficiente cal e sílica no solo.

Ingles e Metcalf (1972) salientaram que os géis de silicato resultantes da reação cobrem e ligam os argilo-minerais, bloqueando os vazios. Os géis cristalizam lentamente, transformando-se em silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio bem definidos, aumentando ainda mais a resistência mecânica da mistura solo-cal. Conforme estes autores, 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. A Figura 2.2 mostra este mecanismo.

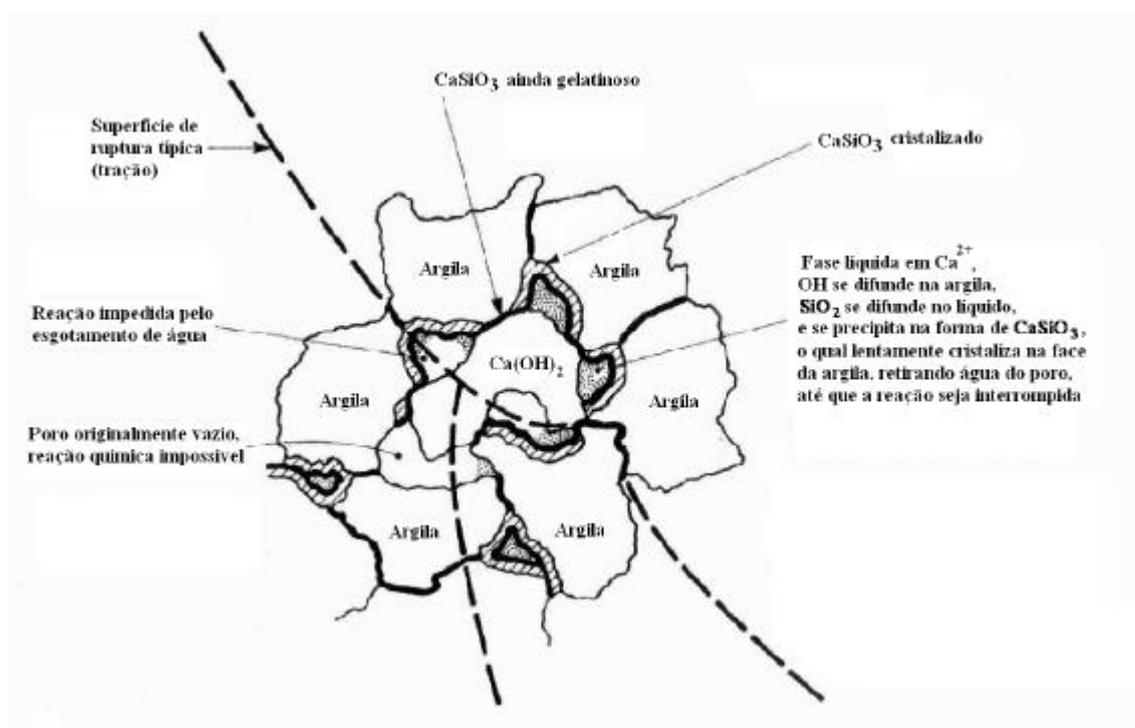


Figura 2. 2 - Mecanismo de estabilização com cal de solos argilosos.

(Fonte: Ingles e Metcalf, 1972)

A carbonatação ocorre quando a cal reage com o dióxido de carbono (anidrido carbônico) da atmosfera produzindo carbonato de cálcio (Little, 1996). A Equação 2.3 sintetiza esta reação como segue:



O carbonato de cálcio é um mineral sólido que se entrelaça com os demais produtos da mistura solo-cal. Segundo Guimarães (1971), o anidrido carbônico está presente nas minúsculas bolhas de ar, absorvidas ou retiradas no momento da mistura ou pela penetração do ar nos poros após a execução. A carbonatação da cal reduz a cal disponível para as reações pozolânicas e a troca catiônica sendo, portanto, uma reação que deve ser evitada se possível (Little, 1996). A quantidade de  $\text{CaCO}_3$  que se formará em solos tratados com cal depende da cal disponível durante o processo de cura (Guimarães, 2002).

Le Roux (1969), citado por Chauvel e Nóbrega (1980), propõe que a compactação seja feita imediatamente após a mistura solo-cal, para evitar a carbonatação. A compactação tem o objetivo de reduzir a porosidade do material, principalmente os macroporos (caminho preferencial do ar), diminuindo a circulação interna de ar.

A presença de matéria orgânica influencia o processo de estabilização retardando as reações e produzindo pequenos ganhos de resistência. Thompson (1964), apud Queiroz de Carvalho (1979), assinala que um solo com um teor de matéria orgânica maior que 1% não responderia à estabilização. Arman e Munfakh (1972), apud Rico e Del Castillo (1993), ensaiaram a resistência à compressão simples uma argila siltosa com teores variáveis de matéria orgânica estabilizadas com 12% de cal, curadas por 7 dias e 28 dias. Os autores constataram uma queda da resistência à compressão simples com o aumento do teor de matéria orgânica, para os dois tempos de cura.

Segundo Rico e Del Castillo (1993), Arman e Munfakh (1972) também fizeram ensaios triaxiais rápidos (UU) em corpos-de-prova de um solo argiloso muito plástico, sem presença de matéria orgânica e de um solo argilo siltoso com 20% de matéria orgânica. Ambos os solos foram estabilizados com 4% e 12% de cal e curados por 28 dias. Analisando as envoltórias de ruptura, concluíram que a presença de matéria orgânica fez com que um solo, em princípio, mais resistente (a argila siltosa) apresentasse menor resistência que o solo de alta compressibilidade.

Resultados um pouco diferentes foram obtidos por Petry e Glazier (2005) quando pesquisaram os efeitos da matéria orgânica na estabilização com cal viva, manufacturando amostras de argila altamente expansiva com acréscimo de 0% (chamado

de solo natural na pesquisa), 2%, 4% e 6% de turfa. As maiores resistências à compressão simples foram as do solo natural; diminuindo à medida que aumentava o teor de matéria orgânica. No entanto, ocorreu um aumento de resistência com a adição de cal viva para todos os tipos de solo, atingindo-se a resistência máxima para um teor dado de cal, chamado pelos autores de Teor ótimo de estabilização com cal (OEC). O OEC era tanto maior quanto maior o teor de matéria orgânica do solo. Segundo os autores, a causa do aumento do OEC é a avidéz da matéria orgânica pelos íons cálcio, interferindo assim nas reações entre os íons cálcio e os argilo-minerais dos solos. Petry e Glazier (2005) concluem que a presença de matéria orgânica afeta as resistências possíveis de serem atingidas com a adição com cal. Os valores de OEC evidenciaram que a estabilização daqueles solos orgânicos era economicamente impraticável.

A temperatura de cura influencia as reações pozolânicas e, conseqüentemente, a velocidade de ganho de resistência (Bhattacharja *et al.*, 2003). 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. A possível queda de resistência máxima pode ser devida à alteração de produtos de reação e sua forma. A solubilidade do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  diminuiria com o aumento da temperatura, reduzindo o suprimento de cálcio.

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 fenômeno, chamado de expansão induzida por sulfatos, em solos argilosos altamente ativos que contêm pelo menos 10% de argilas e onde existe suficiente água para possibilitar a expansão.

Segundo Hunter (1988) e Petry e Little (1992), os sulfatos, quando presentes em suficiente quantidade no solo, interfere nas reações pozolânicas entre os íons  $\text{Ca}^{++}$  liberados da cal e a sílica e a alumina dissolvidas dos argilo-minerais do solo, formando etringita. A etringita pode-se transformar em taumasita se houver fontes adequadas de carbonato e sílica (Petry e Little, 1992) e em condições de temperaturas abaixo de 15°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 e Little, 1992). A etringita e a taumasita são minerais muito expansivos (Metha e Hu, 1978).

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 e Dermatas (1990) identificaram etringita formada em presença de concentrações muito pequenas de sulfato de 0,3%.

### 2.1.3 Solos Apropriados para a Estabilização com Cal

A composição do solo e a química são os fatores que determinam o teor de cal necessário para estabilizar os solos (Petry e Glazier, 2005). Os autores salientam que a efetividade da estabilização com cal depende do grau de alteração do solo, do pH solo-água, da concentração de cátions de base, da concentração sílica-alumina, do teor de sulfatos e do teor de matéria orgânica.

Thompson (1966a) denominou de reativos aqueles solos que ao reagirem com a cal sofrem um substancial ganho de resistência, qual seja, 345 kPa, após 28 dias de cura à temperatura de 22,8 °C. Aqueles solos que apresentam limitada reatividade pozolânica (ganho de resistência inferior a 345 kPa) são denominados de não-reativos.

Ingles (1968) afirmou, baseado em resultados de ensaios desenvolvidos conjuntamente com Metcalf com quinze grupos de solos da Austrália, que parece não haver correlação entre a resposta do solo à estabilização com cal e a sua mineralogia.

Resultados um pouco diferentes foram apresentados por Harty e Thompson (1973), desenvolvendo estudos com o objetivo de identificar as propriedades de solos tropicais e subtropicais que afetam a velocidade de reação e o máximo potencial de reação de cal e do solo. Os autores, adotando o sistema americano de classificação de solos (“*Soil Taxonomy*”), dividindo-os em oxissolos e ultissolos, designações devidas a Fontes e Fontes (1982) e como parâmetro de reatividade o critério de Thompson (1966a), concluíram que nenhuma propriedade é suficiente, por si só, para prever com precisão a reatividade de solos intemperizados tropicais e subtropicais à cal; sendo necessárias pelo menos duas propriedades. A quantidade de sílica ou alumina necessária

para a ocorrência de reações pozolânicas parece ser relativamente pequena mais o tipo de processo de intemperismo que predominou num perfil de solos influencia significativamente o potencial de reatividade de solo à cal. Para ultissolos, o pH do solo e a porcentagem de saturação de bases são índices confiáveis de reatividade à cal. Para oxissolos, a relação sílica/sesquióxidos ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ),  $k_r$ , e em menor extensão, a relação sílica/alumina ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ),  $k_i$ , são excelentes indicadores de reatividade à cal. A reatividade aumenta à medida que diminuem  $k_r$  e  $k_i$ . A drenagem do solo, o teor de ferro removível, a presença de carbonatos livres e de sulfatos não são de valor como índices de reatividade à cal em solos intemperizados tropicais e subtropicais. Os teores de cal para maximizar resistências de solos, nas regiões tropicais e subtropicais, são maiores do que em regiões de clima temperado.

De acordo com Epps, Dunlap e Gallaway (1971), a cal reage com solos médios, moderadamente finos e finos, diminuindo a plasticidade, melhorando a trabalhabilidade, reduzindo a expansão e aumentando a resistência. Para esses autores todos os solos dos grupos A-5, A-6 e A-7 e alguns A-2-6 e A-2-7, do sistema de classificação AASHTO, são susceptíveis à cal. Solos classificados como CH, CL, MH, CL-ML, SC, GC e GM pelo SUCS, devem ser considerados como potencialmente estabilizáveis com cal.

Robbnet e Thompson (1969), citados por Epps, Dunlap e Gallaway (1971), afirmaram que a cal pode ser eficiente em solos com porcentagem de partículas com diâmetro inferior a  $2 \mu\text{m}$  de pelo menos 7% e, IP não inferior a 8%.

Thompson (1975) salientou que, uma vez que os efeitos benéficos da estabilização com cal resultam de várias reações com os finos do solo, os solos mais finos respondem mais favoravelmente. Fixou em 10% o teor mínimo de partículas com diâmetro inferior a  $2 \mu\text{m}$ , embora também tenham sido notados benefícios em solos siltosos com menor teor de argila.

Para o caso de areias argilosas, Arabani e Veis Karami (2005) determinaram variações pouco significativas de resistência à compressão e à tração para teores de argila inferiores a 15%, independentemente do teor de cal adicionado. Para maiores teores de argila, o incremento das resistências à compressão e à tração foi muito significativa, da ordem de 30% para um aumento de 5% no teor de argila. No entanto, os autores observaram quedas de resistência à compressão para teores de argila maiores

de 30%, não sendo assim com a resistência à tração que permaneceu constante ou apresentou pequenos incrementos.

De acordo com os mesmos autores, os principais fatores da resistência à compressão são a coesão e o ângulo de atrito interno, no entanto na resistência à tração a coesão tem um efeito muito maior que o ângulo de atrito interno. Quanto maior teor de argila, maior é a quantidade de produtos cimentantes e, portanto, maior é a resistência à tração alcançada, embora isto não seja certo para teores de argila muito altos. O aumento do teor de argila resulta em um ganho de resistência à tração até que os vazios do solo são completamente preenchidos de partículas finas argilosas, sendo completamente mobilizada a resistência coesiva. No entanto, em compressão qualquer incremento do teor de argila além daquele suficiente para preencher os vazios do solo, resulta em uma diminuição do ângulo de atrito interno. Como conclusão, os autores definem o teor ótimo de argila como aquele que produz a máxima resistência à compressão assim como a máxima resistência à tração.

#### 2.1.4 Alterações nas Propriedades mecânicas de Solos com Adição de Cal

A adição de cal a solos argilosos altera suas propriedades físicas e mecânicas, apresentando, em geral, melhorias na plasticidade, trabalhabilidade, estabilidade volumétrica, condutividade hidráulica, resistência e comportamento tensão-deformação. Essas alterações dependem de diversos fatores tais como: tipo de solo, tipo e teor de cal, energia de compactação, tempo e condições de cura.

##### 2.1.4.1 Plasticidade

Diversos autores salientam que a adição de cal ao solo tem a capacidade de modificar a plasticidade do solo. Com a adição de pequenos teores de cal, o Limite de Plasticidade (LP) aumenta e o Limite de Liquidez (LL) normalmente diminui porém em alguns solos se observe seu aumento (Herrin e Mitchell, 1961). Os comportamentos combinados de LL e LP produzem diminuição do Índice de Plasticidade (IP). Essas

modificações ocorrem logo após a mistura de cal e solo. Após alguns dias de cura, a mistura pode-se tornar não líquida e não plástica. O IP é usualmente reduzido com a adição de pequenos teores de cal. À medida que o IP tende a diminuir com o aumento do teor de cal, o Limite de Contração (LC) aumenta (Basma e Tuncer, 1991). Os tempos de cura das misturas solo-cal não têm efeito algum nas modificações das propriedades plásticas (Basma e Tuncer, 1991). Portanto, a troca catiônica e a floculação são a causa das rápidas mudanças nos limites de consistência.

Geralmente, o LL é reduzido nas argilas mais plásticas e aumentado em solos menos plásticos (Núñez, 1991). Castro e Luis (1974) observaram que o IP de solos pouco plásticos pode sofrer ligeiro aumento. Segundo Brandl (1981), o aumento do LL e a pequena variação do LP se devem à pequena quantidade de argila coloidal e à baixa atividade físico-química de solos siltsos ou areias ricas em cálcio ou dolomita.

Hilt e Davidson (1969) assinalam que os efeitos de aumento no LP são mais acentuados em solos contendo montmorilonita, ao passo que aqueles que contêm caolinita são pouco afetados. Esses autores introduziram o conceito do “*lime fixation point*” (LFP), teor de cal até o qual a sua adição contribui para melhoria na trabalhabilidade do solo, sem produzir aumento de resistência. Esse teor seria o ótimo para modificar a plasticidade. Para teores de cal maiores ao LFP, o solo ganha resistência, mas não tem mais afetados o IP e a trabalhabilidade.

Mateos (1964) observou que solos argilosos e siltsos tratados com cal melhoram quanto à plasticidade e contração e adquirem aparência de friáveis. O hidróxido de cálcio é o principal responsável pela redução da plasticidade, sendo o IP de solos ricos em ilita pouco afetados pela adição de cal.

#### 2.1.4.2 Características de Compactação

Devido às reações entre a cal e o solo ocorrem mudanças na relação teor de umidade – peso específico (Neubauer e Thompson, 1972). O teor de umidade ótima ( $\omega_{6t}$ ) das misturas solo-cal aumenta em comparação com o solo natural, e o peso

específico seco máximo ( $g_{dmáx}$ ) diminui para uma mesma energia de compactação. À medida que o teor de cal aumenta o  $g_{dmáx}$  continua diminuindo (TRB, 1987).

O processo de floculação das partículas do solo, quando adicionada cal, seria a principal causa destes fenômenos, já que a quantidade e o tamanho dos vazios dos solos aumentam. A estrutura floculada é o suficientemente forte para resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais alto, reduzindo assim o  $g_d$  do solo. Entretanto, a compactação se efetua logo após da mistura, quando ainda não aconteceram as reações pozolânicas. Sendo que a massa específica aparente da cal é bem menor que a de solo, o resultado é uma mistura de menor peso específico aparente seco. Quanto mais vazios houver, mais água será necessária para preenchê-los o que resultará em uma  $\omega_{ót}$  maior, e uma curva de compactação mais achatada (Sivapullaiah *et al.*, 1998).

No entanto, Tuncer e Basma (1991) ao estabilizarem um solo com 54% de argila e 43,7% de silte do norte de Jordânia com 3%, 6% e 9% de cal, constataram que não ocorrem modificações significativas nos parâmetros de compactação. Segundo os autores, essas observações seriam contraditórias com a concepção geral que a cal diminui o  $g_{dmáx}$  e aumenta o  $\omega_{ót}$ . El-Rawi e Awad (1981), apud Tuncer e Basma (1991), atribuem o aumento do  $\omega_{ót}$  às reações pozolânicas, sendo sua diminuição possivelmente causada pela troca catiônica. Portanto, o balanço entre estes dois mecanismos resultaria em pequena ou nenhuma mudança no teor de umidade ótima, e conseqüentemente o  $g_d$  não se modifica.

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  $g_d$  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 diminuiriam 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 da 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) estudando o efeito do tempo entre mistura e compactação em solos estabilizados com cal, para tempos de 0,5 a 3 dias, observaram que 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.

#### 2.1.4.3 Comportamento Tensão-Deformação

Os efeitos de cimentação de solos estabilizados com cal tornam às misturas mais rígidas respeito ao comportamento tensão-deformação (Thompson, 1965). A tensão de ruptura aumenta significativamente, enquanto que a deformação na ruptura diminui. Para os solos de Illinois, Thompson (1966b) obteve o modelo seguinte:

$$E = 9,98 + 0,124 \text{ RCS} \quad (2.4)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal na compressão em ksi correspondente a uma tensão confinante de 15 psi e RCS é a resistência à compressão simples em psi.

Para o solo do norte da Jordânia, Tuncer e Basma (1991) observaram que o módulo de elasticidade tangente não-drenado ( $E_u$ ) aumentou com o teor de cal e com o tempo de cura. O aumento foi observado mesmo em corpos-de-prova não-curados, devido à diminuição da deformação axial unitária ( $\epsilon_r$ ) na ruptura, no entanto não se observa aumento da resistência última ( $q_u$ ). Para tempos de cura de 28 dias, o solo tratado com 3% de cal não apresentou ganhos de  $q_u$ , mas a  $\epsilon_r$  continuou diminuindo, portanto aumentando o  $E_u$ . Os corpos-de-prova de solo estabilizado com 6% e 9% de cal apresentaram elevados valores de  $q_u$  e exibiram uma ruptura de tipo frágil. Portanto, o valor de  $E_u$  continua aumentando.

Para o solo argiloso de Canoas, Thomé (1994) observou que o módulo secante entre a origem e 0,75 vezes a tensão normal de ruptura ( $0,75\sigma_{rup.}$ ) aumenta com o teor de cal como mostra o modelo abaixo:

$$E = 690,92 + 125,17 \times (\% \text{ de cal}) \quad (2.5)$$

sendo E o módulo secante medido em kPa, correspondente a uma tensão confinante de 20 kPa.

#### 2.1.4.4 Resistência

A resistência de misturas solo-cal é normalmente avaliada em laboratório através de diferentes ensaios: compressão simples, compressão triaxial, compressão diametral, Índice de Suporte Califórnia (ISC) (Little, 1999). A resistência depende de diversas variáveis, como: tipo de solo e cal, teor de cal, tempo e temperatura de cura (TRB, 1987).

O método mais comum de medida de resistência de misturas solo-cal é o ensaio de compressão simples. Existem diferentes normas para executar este ensaio e os resultados variam notavelmente dependendo da norma empregada, mas o fato mais importante é o aumento da resistência devido à estabilização com cal (Little, 1999).

As reações rápidas de troca catiônica e flocculação, que produzem alterações na plasticidade e nas propriedades de compactação, resultam em ganhos imediatos de RCS (Neubauer e Thompson, 1972). Estes ganhos de resistência podem variar desde valores modestos até várias centenas de vezes quando comparados ao solo não estabilizado, em condições similares.

O aumento da RCS é permanente ao longo do tempo devido às lentas reações pozolânicas. Tuncer e Basma (1991) ensaiaram à compressão simples um solo do norte de Jordânia com 54% de argila e 43,7% de silte, LL de 74% e IP de 39%, estabilizado com 3%, 6% e 9% de cal. A adição de 3% de cal resultou em ganho relativo pequeno de resistência, inclusive para 28 dias de cura, indicando os autores, que este nível de tratamento não é suficiente para produzir o grau requerido de reações pozolânicas para a formação adequada de produtos cimentantes. Já, para 6% e 9% de cal, a RCS aumenta

significativamente, além de aumentar constantemente com o tempo de cura. As reações pozolânicas seriam as responsáveis pelo ganho de RCS, concluem os autores.

Puppala *et al* (1996), avaliaram as variações na RCS de uma argila siltosa do Estado de Louisiana, USA, estabilizada com 4% de cal. O Limite de Liquidez (LL) e o Índice de Plasticidade (IP) do solo natural foram de 46% e 27% respectivamente. Os corpos-de-prova foram compactados para 5 condições diferentes de peso específico seco e teor de umidade, tal como é feito no ensaio de compactação Proctor. Encontraram valores de RCS variando de 22,4 a 180,1 kPa para o solo natural, entre 43,6 e 197,1 kPa logo após de feita a mistura, e entre 89,3 e 236,4 kPa para as misturas solo-cal após de 3 dias de cura. O ganho imediato da RCS mostra que algumas reações pozolânicas iniciam em curto prazo. Mas o tempo de cura é necessário para facilitar as reações químicas de estabilização.

Os autores assinalam que a porcentagem de aumento na RCS é maior no ramo úmido da curva de compactação do que no ramo seco, indicando a importância da presença de um maior teor de umidade para uma melhor estabilização (Puppala *et al.*, 1996).

Kavak (1996), apud Kavak *et al.* (2005), examinou a variação a longo prazo da RCS de caolinitas e bentonitas estabilizadas com cal. A RCS aumentou 6 vezes na bentonita e 12 vezes na caolinita, após um mês. Também observou aumento uniforme de resistência durante 10 anos.

Behak (2001), pesquisando solos residuais arenosos basálticos do norte do Uruguai observou aumentos de RCS com o aumento do teor de cal até atingir um valor máximo para um teor de cal de 5%, diminuindo para maiores teores. Existiria um teor de cal de saturação para o qual o processo de estabilização é eficiente. Para teores maiores, a cal em excesso não reage, afetando a resistência.

O ISC de um solo fino aumenta instantaneamente com adição de cal e continua aumentando com o tempo de cura, se o teor de cal for superior ao LFP (Mateos, 1964). Lucena e Brugnara (1970) estudaram o comportamento de um solo argilo-arenoso da região de Cruz Alta (RS) estabilizado com cal e observaram que as misturas solo-cal apresentam ISC máximo com 4% de cal. Para teores de cal maiores que 4% a capacidade suporte diminuiu de forma contínua.

Kavak *et al* (2005) pesquisaram a evolução do ISC com o tempo de cura para 3 solos finos (2 classificados como MH e 1 classificado como CH) e 1 solo areno-argiloso (SC). Para todos os casos, o aumento do ISC foi significativo com 1 h de cura. O aumento continuou a ser significativo para 7 dias de cura, sendo entre 14 a 34 vezes maior em comparação com o ISC do solo natural. No entanto com 28 dias de cura os ISC eram muito similares aos correspondentes a 7 dias. Alias, observou-se uma diminuição dos ISC dos solos finos estabilizados. O teor de umidade e a temperatura de cura são assinalados pelos autores como a causa dessa diminuição dos ISC aos 28 dias, mas sem explicitar como.

Thompson (1975) salientou que, embora seja usado de forma extensiva, o ISC não é apropriado para caracterizar a resistência de solos estabilizados com cal. Os valores de ISC para misturas curadas podem ser superiores a 100%. Nesses casos é notório que o resultado do ensaio é de escasso significado prático. Se as reações pozolânicas não se tiveram desenvolvido, como no caso de amostras não curadas, o ISC pode servir como indicativo geral de resistência.

O efeito principal na resistência de solos finos estabilizados com cal é a geração de coesão real entre partículas, devida à cimentação (Thompson, 1966b), sendo o aumento do ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) bem menos expressivo. A coesão real produzida pela estabilização de solos com cal proporciona resistência à tração (Seddom e Bhindi, 1983), portanto, o surgimento de resistência à tração demonstra a ocorrência de cimentação pozolânica.

Núñez (1991), estabilizando com cal um solo residual de arenito Botucatu, observou que a mistura de solo-9% de cal desenvolveu apreciável resistência à tração por compressão diametral de 260 kPa. O autor, concluiu que o tempo de cura é extremamente importante para o desenvolvimento de resistência à tração nas misturas compactadas de solo e cal.

Seddom e Bhindi (1983), assinalaram um valor de resistência à tração direta de 80 kPa como fronteira entre as fases estabilizadas e modificada das misturas de solo e cal. Para a National Institute for Transportation and Road Research (1986) a resistência à compressão diametral é, em torno de 1,5 vezes o valor da resistência à tração direta.

Portanto, o valor limite entre as fases estabilizada e modificada corresponderia a uma resistência à tração por compressão diametral (RCD) de 120 kPa.

Thompson (1965) determinou um quociente entre as resistências à tração na compressão diametral e à compressão simples (RCD/RCS) para misturas de solo-cal variando de 0,10 a 0,15 (valor típico de 0,13) sem importar o tipo ou teor de cal.

O retardamento na compactação reduz a resistência de misturas solo-cal. Núñez (1991) observou reduções de até 50% da RCS de um solo areno-siltoso estabilizado com cal. Com apenas uma hora de retardamento a resistência foi reduzida em 42%, sendo que toda a redução na RCS ocorreu na primeira hora para o teor de cal de 7%, mantendo-se praticamente constante para maiores tempos de retardamento. Já, para misturas com 5% de cal, a resistência continuou diminuindo com retardamento na compactação superior a 2 h. Segundo Mitchell e Hooper (1961), a queda de resistência pelo retardamento na compactação de misturas solo-cal é devida ao aumento da floculação, que ocasiona uma redução no peso específico da mistura.

Sivapullaiah *et al.* (1998) também constataram uma diminuição na resistência de misturas solo-cal não compactadas imediatamente após a mistura. Para um solo argiloso com montmorilonita como argilo-mineral predominante, estabilizado com 2% de cal, na umidade ótima, os autores observaram uma diminuição de 241 kPa para 117 kPa na RCS ao deixarem o material solto durante 24 horas antes da compactação. Para 7 dias de retardamento na compactação, caiu para 83 kPa. Esta queda na resistência dever-se-ia ao fato de que os compostos cimentantes que se formam neste período não contribuiriam para o ganho de resistência, causando, contudo, redução do peso específico aparente seco da mistura compactada.

Contrariamente, Holt *et al.* (2000) constataram que um solo contendo caolinita, ilita, vermiculita e quartzo, ao ser estabilizado com cal, apresentou sua RCS máxima com um tempo de retardamento na compactação de 12 a 24 horas. Para períodos maiores de 1 dia de retardamento, observa-se uma sensível redução na resistência.

As argilas expansivas apresentam uma resposta mais rápida à adição de cal. Bell (1996) constatou um rápido aumento inicial na RCS de um solo argiloso com montmorilonita como argilo-mineral predominante, para pequenos teores de cal (2 a 3%). A resistência máxima deste solo foi atingida para um 4% de cal, enquanto para o

caso de um solo argiloso caolinítico foi necessário de 4 a 6% de cal. Entretanto, o nível de resistência alcançado pela mistura solo caolinítico – cal foi sensivelmente superior ao da outro.

McDowell (1953), citado por Clare e Cruchley (1957), observou que a RCS de misturas solo-cal aumenta com o tempo de cura. Os processos cimentantes de longo prazo, com a cristalização dos silicatos e aluminatos seria a razão de tal efeito.

Núñez (1991) estudou a estabilização de um solo areno-siltoso com diferentes teores de cal. Constatou que a RCS aumenta em forma contínua e linear com tempos de cura de até 90 dias.

Similares resultados observaram Santos e Pomatti (2000) para o caso de estabilização de um solo contendo 25% de argila com 7% de cal. A RCS aumentou constantemente com tempo de cura até 60 dias. A RCD também aumentou de forma contínua com o tempo de cura, com uma queda aos 90 dias de cura.

Bollens e Verbrugge (2005) analisaram a influência da temperatura de cura sobre o comportamento resistente do solo com 80% mais fino de 80  $\mu\text{m}$  e 20% de fração argila e estabilizado com 3% de cal viva. Os autores compararam os resultados de ensaios triaxiais com tempos de cura entre 8 e 675 dias à temperatura ambiente (22°C) e à temperatura de 40°C. A coesão aparente ( $c$ ) das misturas curadas a temperatura ambiente foi 23 vezes maior e o ângulo de atrito ( $\phi$ ) não apresentou variação após quase 2 anos de cura, com relação ao solo natural, para as misturas curadas 40°C os autores observaram um aumento da  $c$  e do  $\phi$  de entre 10 e 20 vezes com respeito ao solo. Os resultados obtidos são coincidentes com os observados por Verhasselt (1978), quem salientou que as reações pozolânicas da cal com os argilo-minerais não são as mesmas dependendo sim a temperatura de cura está acima ou abaixo de certo valor crítico próximo à 40°C.

#### 2.1.4.5 Durabilidade

Os principais fatores que afetam a integridade estrutural de materiais estabilizados são as condições ambientais (variações de temperatura e umidade) e as

solicitações impostas pelo tráfego, que degradam o pavimento por fadiga (Marcon, 1977).

A durabilidade de misturas solo-cal se avalia com ensaios laboratoriais não normalizados, como os que incluem ciclos de molhagem e secagem e/ou congelamento e degelo. O objetivo destes ensaios é simular da melhor forma possível, às condições de campo. Porém, o ensaio de congelamento e degelo é mais adequado para regiões frias, sendo o ensaio de molhagem e secagem mais conveniente para regiões mais temperadas ou tropicais. Ambos os ensaios determinam a durabilidade através da perda de peso e/ou resistência após aplicação de sucessivos ciclos de molhagem e secagem ou congelamento e degelo.

Dependendo do período, a exposição às condições de molhagem-secagem geralmente reduz a RCS em comparação às condições não-saturadas (Bhattacharja *et al.*, 2003). Segundo estes autores, a degradação produzida por ciclos de molhagem e secagem é geralmente cumulativa, sendo também diminuída gradualmente a resistência à compressão de solos estabilizados até a total desintegração.

Quando uma amostra de solo estabilizado é imersa em água, esta penetra na amostra ou sai através dos vazios (Bhattacharja *et al.*, 2003). A tensão superficial da água é o suficientemente elevada para gerar pressões capilares que causam trincas na matriz, principalmente em materiais cimentados com baixa resistência à tração. As sucessivas saídas e entradas de água durante os ciclos de molhagem e secagem fazem com que as forças de tração causem danos irreversíveis à integridade estrutural do material e, devido a seu efeito cumulativo, eventualmente, a amostra entra em colapso.

Petry e Wohlgemuth (1988) reportam um gradual incremento da durabilidade à molhagem e secagem de solos estabilizados com cal quanto mais fina é a graduação do solo. Para eles, o efeito de desintegração gradual de amostras submetidas a ciclos de molhagem e secagem é primariamente atribuído a mudanças em parâmetros como o ângulo de atrito interno e a coesão, a tensão exercida pela pressão capilar, tamanho dos poros e porosidade e teor de umidade da amostra.

Por sua vez, Little (1999) afirmou que o efeito dos ciclos de molhagem e secagem depende do nível de resistência inicial prévio à aplicação dos ciclos. O autor demonstrou que amostras submetidas a ciclos de molhagem e secagem, após terem

ocorrido reações pozolânicas, sofrem uma queda de RCS menor que 10%. No entanto, quando os ciclos são aplicados antes que as reações pozolânicas aconteçam, a queda de RCS é de 40%.

Exposições prolongadas na água por imersão não têm grandes efeitos na queda de resistência (Little, 1999). Maertens *et al.* (2005), pesquisaram a evolução mecânica devida à saturação de uma argila siltosa da região de Flanders, Bélgica, tratada com 2% de cal viva. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto adensado e não drenado e de penetração de cone (CPT) antes da saturação e após de 1 ano de saturação indicaram evolução na resistência do solo estabilizado com o tempo e que as condições de saturação não influem essencialmente. Para o caso dos ensaios de cisalhamento direto a coesão aparente ( $c$ ) quase duplicou após de 1 ano de saturação e o  $\phi$  aumentou ligeiramente de 29,5° para 31,5°. A resistência no CPT mostrou um aumento de 0,5 MPa para entre 1 e 2,5 MPa após 1 ano de saturação.

## 2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ E CAL

### 2.2.1 Breve Histórico do Uso da Cinza de Casca de Arroz na Engenharia Civil

A estabilização de solos com cal ou cimento Portland e cinza de casca de arroz (CCA) é um método relativamente pouco divulgado (Ali *et al.*, 1992).

Korisa (1958) assinalou que as cinzas tratadas atuam como agregados inertes e competentes quando empregadas em telhas de blocos de cimento de alta qualidade.

Grist (1965), apud Rahman (1986), relatou a utilização de misturas de cimento e CCA na Índia para a fabricação de tijolos isoladores que resistiram temperaturas muito altas, sendo apropriados para uso em fornos.

Lazaro e Moh (1970) pesquisaram misturas de CCA e cal como estabilizadores de argilas sedimentares, concluindo que podem ser obtidas consideráveis melhorias no comportamento de argilas sedimentares com adição de CCA.

Nos meados dos anos 70, Metha, professor de ciências de engenharia da University of Califórnia, Berkeley, desenvolveu e patenteou um processo para manufaturar cimentos com base em CCA (Metha, 1975).

A partir dos anos 80 e 90, foi desenvolvido um maior número de pesquisas relacionadas com a estabilização de solos com CCA e cal ou cimento. Rahman (1986) estabilizou solos lateríticos na Nigéria, recomendando um teor de 18% de CCA para materiais a serem utilizados como camadas de sub-base. A particularidade da pesquisa de Rahman (1986) foi que misturou os solos lateríticos só com CCA, ou seja, sem nenhum outro aditivo.

Já, Ali *et al.* (1992) pesquisaram os efeitos da estabilização de solos da Malásia por adição de CCA combinada com cal ou cimento. Concluíram que nos países tropicais, onde a casca de arroz é abundante e considerada como resíduo, o uso de CCA em obras de pavimentação é particularmente atrativo, porque ajudariam a reduzir custos construtivos e de deposição, bem como danos ambientais, preservando, ainda, os materiais de maior qualidade para usos prioritários.

Conclusões similares foram obtidas em pesquisas desenvolvidas por Muntohar e Hantoro (2000) e por Basha *et al.* (2005). Muntohar e Hantoro (2000) avaliaram o comportamento de solos silto-argilosos da Indonésia quando estabilizados com CCA e cal. Basha *et al.* (2005) estabilizaram com CCA e cimento um solo residual areno-siltoso da Malásia, concluindo que a CCA pode estabilizar solos residuais, tanto quando incorporada de forma isolada, como quando misturada com cimento. Adotando-se a CCA como alternativa, é possível reduzir os custos de construção, particularmente nas regiões rurais dos países em desenvolvimento.

Na região sul-americana, destaca-se a pesquisa desenvolvida por Rodríguez (2000) na Universidade Federal de Rio Grande do Sul, relacionada com a utilização da CCA como cimento para concretos de alto desempenho e convencionais. A utilização de CCA neste caso conduz a reduzir os volumes de cimento, gerando concretos mais leves e econômicos. Na pesquisa, executada no Brasil, foi empregada CCA residual da produção de arroz do Uruguai.

### 2.2.2 A Casca de Arroz e a Cinza de Casca de Arroz

Muitas plantas, durante seu crescimento, absorvem sílica do solo e a acumulam dentro de suas estruturas; uma dessas plantas, com alta concentração de sílica, é a planta de arroz (Boateng e Skeete, 1990). Boa parte da sílica se concentra na casca de arroz, conformando uma estrutura muito resistente às condições do meio ambiente, capaz de proteger ao próprio grão de arroz.

A casca de arroz é tipicamente composta de: celulose (40-45%), lignina (25-30%), cinza (15-20%) e água (8-15%). A cinza é principalmente derivada da opalina, da qual cerca de 90% é sílica. Ali *et al.* (1992) assinalam que o teor de sílica na casca de arroz depende da variedade de arroz, do tipo de solo e das condições climáticas, da temperatura predominante e das práticas agrícolas, especialmente quanto à aplicação de fertilizantes, inseticidas, etc.

Devido a seu caráter abrasivo e quase desprezível conteúdo de proteínas digestíveis, a casca de arroz não é apta para alimento animal (Boateng e Skeete, 1990). Além disso, Metha (1979) relatou que os altos teores de cinza e lignina tornam a casca de arroz inapta como matéria prima para manufatura de papel. A casca de arroz é, portanto, um subproduto da produção de arroz.

A casca de arroz é o maior subproduto da produção de grãos. Estima-se que de cada 4 toneladas de arroz coletadas, 1 tonelada é casca de arroz (Ali *et al.*, 1992). A produção de casca de arroz ultrapassou os 100 milhões de toneladas por ano no mundo em 1996 (Velupillai *et al.*, 1996).

O teor de sílica da casca de arroz pode ser aumentado convertendo-se-a em cinza, através da incineração. A CCA resultante contém 90 – 96% de sílica (Juliano, 1985). Korisa (1958), Lazaro e Moh (1970) e Basha *et al.* (2003), determinaram a composição química das CCA mostradas na Tabela 2.1. Inclui-se na Tabela 2.1 a composição química, determinada por Rodríguez (2002), de uma CCA residual da queima da casca de arroz num forno sem controle de temperatura no Uruguai.

Tabela 2.1 – Composição química de várias cinzas de casca de arroz

Composição química (%)	Korisa (1958)		Lazaro e Moh (1970)	Basha <i>et al.</i> (2003)	Rodríguez (2002)
	Mostra 1	Mostra 2			
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	94,5	93,5	88,6	93,15	87,2
Óxido de Cálcio (CaO)	0,25	2,28	0,75	0,41	0,55
Óxido de Magnésio (MgO)	0,23	---	3,53	0,45	0,35
Óxido de Sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,78	---	---	---	1,12
Potássio (K <sub>2</sub> O)	1,10	3,15	---	2,31	3,60
Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	traços	1,01	0,36	0,21	0,16
Óxido Fosfórico (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,53	---	---	---	---
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	traços	traços	1,48	0,21	0,15
Óxido de Manganês (MnO <sub>2</sub> )	traços	traços	---	---	---
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	---	---	0,51	---	---

Por sua vez, Ali *et al.* (1992) analisaram a composição química de CCA obtida por incineração a céu aberto de casca de arroz depositada em pilhas, perto dos moinhos de arroz. Antes de ser analisada, a cinza foi secada em forno a 60°C. Tabela 2.2 mostra a composição química desta CCA.

Tabela 2.2 – Composição química da cinza de casca de arroz incinerada a céu aberto

Elemento	Teor (%)
SiO <sub>2</sub>	90,73
Ca	0,022
Fe	0,226
Cu	0,002
Mn	0,042

### 2.2.3 Temperatura de Incineração da Casca de Arroz

Houstin (1972) assinala que as propriedades da CCA dependem significativamente do processo de queima da casca. O autor propôs a seguinte classificação para a CCA, segundo as condições de queima: escamas com alto conteúdo de carvão (preta), cinza de baixo conteúdo de carvão (cinza), cinza livre de carvão (cor-de-rosa ou branca). As cores são associadas com o grau de evolução do processo de

combustão e com as transformações estruturais da sílica na cinza (Boateng e Skeete, 1990). Para estes autores, as cores brancas são indicadoras de oxidação total do carvão na cinza. Temperaturas muito elevadas e longos períodos de incineração produzem cinza cor-de-rosa representativa de sílica em forma de cristobalita e tridimita, ou seja, a cinza se apresenta na forma cristalina e não amorfa.

James e Rao (1986) afirmaram que a qualidade da CCA depende da temperatura e tempo de incineração, do tempo de resfriamento e das condições de moenda. Para estes autores, a sílica na cinza sofre transformações estruturais sob condições de temperatura variável.

Boateng e Skeete (1990) assinalam que o tipo de cinza apropriada para as reações pozolânicas é a amorfa e não a cinza cristalizada. Segundo estes autores, a incineração da casca de arroz em uma faixa de temperatura de 550 a 700°C é geralmente determinada para produzir sílica amorfa na cinza, entretanto temperaturas além de 900°C produzem formas cristalinas não desejáveis. Contudo, Smith e Kamwanja (1986) observaram formação de sílica cristalina em pequenas proporções para temperaturas inferiores a 800°C mantidas durante 12 h.

Ali *et al.* (1992) observaram um padrão do difratograma de raios-X de uma CCA obtida por incineração a céu aberto com dois picos de grande intensidade, um para a distância de 0,344 nm típico do quartzo e outro na distância de 0,425 de tridimita.

As transformações estruturais a diferentes temperaturas afetam a reatividade das CCA já que quanto maior a superfície específica da sílica, tanto maior o alcance das reações químicas com a cal (Boateng e Skeete, 1990). Para quantificar a reatividade da cinza com a cal, Metha (1979) definiu o índice de atividade da sílica (IAS) como a percentagem de sílica que se dissolve durante 3 minutos em uma concentração de 0,5N de hidróxido de sódio (NaOH) em ebulição, sendo uma medida do grau de amorfismo da sílica na cinza. O difratograma de raios-x e também uma ferramenta usual na determinação qualitativa do grau de cristalinidade da sílica na cinza (Skeete e Boateng, 1990).

A tecnologia de produção de cinza varia desde queima a céu aberto até incineradores especialmente projetados incluindo leitos fluidificados (Metha, 1979). Devido aos altos gradientes de temperatura e à formação resultante de estruturas silíceas

altamente cristalinas, a incineração a céu aberto é associada a pozolanas de baixo índice de reatividade (Boateng e Skeete, 1990).

Segundo Metha (1975), quando queimada a céu aberto ou em fornos convencionais, a casca de arroz produz cinza silícea cristalina. Contudo, quando incinerada em fornos a temperatura controlada, o resíduo é uma cinza branca altamente reagente que misturada com cal se transforma em um cimento estruturalmente tão bom quanto o cimento Portland.

Boateng e Skeete (1990) pesquisaram a CCA sob condições de temperatura controlada entre 800°C e 900°C, incinerando casca de arroz em um forno projetado por eles. Nessas condições de incineração constataram que o IAS foi elevado (entre 47% e 73%) em comparação com o resultante da queima a céu aberto, das quais usualmente se reportam IAS menores de 20%.

Rahman (1986), queimando casca de arroz coletada em Nigéria, em um forno a temperatura controlada de 800°C determinou na CCA obtida um remanescente de matéria orgânica menor de 3%. A massa específica aparente da cinza foi de 2,35. O forno utilizado na pesquisa foi do tipo desenhado por Williams e Sompong (1971).

Segundo Rodríguez (2000) para o caso do Uruguai, a CCA residual do processo de queima de casca de arroz num forno sem controle de temperatura seria cristalina, de tipo cristobalita, de acordo com os picos observados no espectro de difração de raios-X. A pesar dessa observação, o IAS resultou ser de 92,9% em amostras moídas durante 5 h. Para um tempo de moagem de 4 h, o IAS resultante foi de 86,8%. Rodríguez (2000) pesquisou mais uma CCA produzida por incineração controlada, proveniente dos Estados Unidos. O espectro de difração de raios-X desta cinza correspondeu a uma CCA amorfa. A autora não relata a temperatura de incineração da cinza amorfa, nem seu IAS.

#### 2.2.4 Solos Adequados para a Estabilização com Cinza de Casca de Arroz e Cal

Segundo a American Society for Testing and Materials (ASTM) pozolana é um material silicoso ou silico-aluminoso que, por si só possui pouca ou nenhuma

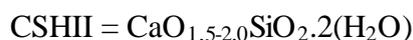
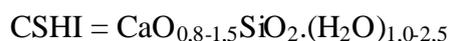
capacidade de cimentação, porém em forma finamente dividida e na presença de água reage quimicamente com hidróxidos alcalinos e alcalinos terrosos à temperatura ambiente, para formar ou contribuir para a formação de compostos cimentantes. Seguindo esta definição da ASTM a CCA, composta em mais de 90% por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é uma pozolana.

A compreensão das reações é difícil, mas se sabe que a cinza desenvolve reações pozolânicas e que sua mistura com cal tem as mesmas características de solo-cal.

A química da CCA envolve as reações pozolânicas da sílica amorfa da cinza com a cal para formar silicatos hidratados de cálcio (CSH) (Boateng e Skeete, 1990). James e Rao (1986) afirmam que os silicatos formados são do tipo CSHI e CSHII, segundo a Equação 2.6:



onde



As mudanças estruturais afetam a trabalhabilidade e a reatividade da cinza; quanto maior a superfície específica da sílica tanto mais eficaz a reação química com a cal (Boateng e Skeete, 1990).

Os solos arenosos com pouca argila, portanto com pouca sílica amorfa, não reagem satisfatoriamente à cal. Para estabilizá-los, quando o consumo de cimento é muito elevado ou economicamente inviável ou quando a correção granulométrica não é possível, a adição de CCA e cal pode ser uma alternativa.

Ali *et al.* (1992) pesquisaram os efeitos da estabilização com CCA produzida por incineração a céu aberto e cal ou cimento em um solo residual granítico de Malásia, classificado segundo o SUCS como SC. A graduação granulométrica do solo estudado foi: 1% de pedregulho, 52% de areia, 15% de silte, 32% de argila,. A partir dos resultados do difractograma de raios-X, os autores estabeleceram que o argilo-mineral predominante na fração argilosa é caolinita. Ali *et al.* (1992) constataram de difratogramas de raios-X feitos em amostras de misturas do solo residual-CCA-Cal com 7, 28 e 90 dias de cura a formação de silicatos hidratados de cálcio ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  e CSH (I))

e de alumino-silicatos hidratados de cálcio ( $C_2ASH_8$ ). Os autores também verificaram a eficiência das misturas solo-CCA-cal em termos de resistência à compressão simples e de durabilidade.

Especial pesquisa sobre estabilização de solos com CCA produzida em incinerador e cimento foi desenvolvida por Basha *et al.* (2003). Três tipos de solo foram usados no estudo, um solo residual granítico, uma caolinita e uma bentonita, as duas últimas comercialmente disponíveis. O solo residual era basicamente fino, com 46% de fração areia, 44% de silte e 10% de argila. O Índice de Plasticidade (IP) da fração fina era 14%, identificando-se caolinita como o argilo-mineral constituinte da fração argila. Os autores concluíram que a CCA misturada com cimento pode potencialmente estabilizar solos expansivos e não expansivos. Sua utilização é apropriada para reduzir os custos construtivos, particularmente nas áreas rurais dos países em vias de desenvolvimento.

Conclusões similares foram obtidas por Basha *et al.* (2005) quando pesquisaram a estabilização com CCA produzida em incinerador e cimento do mesmo solo residual estudado por Basha *et al.* (2003). Na ocasião, os autores observaram, mediante difratometria de raios-X de amostras de solo residual-CCA-cimento com 7 dias de cura, a formação de analcita (um sódico-alumino-silicato hidratado) e carbonato, produtos que indicam a ocorrência de reações pozolânicas com produção de materiais cimentantes.

Rahman (1986) estabilizou um solo laterítico com 45% de fração passante na peneira No. 200 e IP de 27%. O solo laterítico foi classificado pelo autor como A-7-6. A particularidade da pesquisa foi que o autor analisou separadamente misturas de solo-CCA, solo-cal e solo-cimento. Conclui que o potencial de estabilização de solos lateríticos com CCA é considerável em comparação com o da cal e do cimento. Como a CCA e os solos lateríticos são materiais abundantes em todos os países tropicais e subtropicais, segundo o autor, a CCA pode potencialmente se utilizar como um substituto da cal e do cimento com o objetivo de reduzir custos de construção, particularmente em áreas rurais dos países menos desenvolvidos. Salienta-se que nenhuma explicação é dada para o aumento do ISC do solo ao ser adicionada tão somente cinza de casca de arroz.

Muntohar e Hantoro (2000) analisaram os efeitos sobre as propriedades físicas e mecânicas de um solo definido como argiloso, com um teor de partículas finas de 91%, resultante da soma de 81% de silte e 10% de argila, estabilizado com CCA e cal. O Limite de Liquidez (LL) do solo ensaiado foi de 74% e o IP de 41%. Os autores não comentam sobre a constituição dos argilo-minerais, mas o alto potencial expansivo do solo natural (19,23%) indicaria presença de montmorilonita. Concluíram que as propriedades físicas analisadas foram melhoradas com a adição de CCA e cal.

#### 2.2.5 Efeitos da Estabilização com Cinza de Casca de Arroz e Cal nas Propriedades dos Solos

A adição de CCA conjuntamente com outro agente estabilizante, tal como cal e o cimento, a solos arenosos ou areno-siltosos altera suas propriedades físicas e mecânicas, ocasionando, em geral, melhorias na plasticidade, resistência, tensão-deformação e durabilidade. Essas alterações dependem de diversos fatores tais como: tipo de solo, temperatura de incineração da casca de arroz, tipo e teor de cal, energia de compactação, período e condições de cura.

##### 2.2.5.1 Plasticidade

Rahman (1986) apresenta resultados de Limites de Atterberg de um solo laterítico, classificado como A-7-6 (45% de fração passante na peneira No. 200 e IP de 27%), estabilizado de forma separada com CCA e com cal. Os Limites de Liquidez (LL) e os Limites de Plasticidade (LP) aumentaram linearmente com o aumento do teor de CCA e de cal. O aumento do LL foi pouco significativo, passando de 50% no solo natural para 54% quando é adicionado 20% de CCA. No entanto o aumento do LP foi pouco mais significativo, sendo 23% para o solo natural e 39% para o solo estabilizado com 20% de CCA. Como consequência o IP diminuiu linearmente com o aumento do teor de CCA, desde 27% para o solo sem estabilizar para 16% quando estabilizado com

20% de CCA. Na opinião do autor, a adição de CCA e cal a solos finos causa a floculação do solo, produzindo a diminuição do IP.

Comportamento similar dos parâmetros de plasticidade foi obtido por Basha *et al.* (2005) na estabilização com CCA de um solo residual basicamente fino (46% de fração areia, 44% de silte e 10% de argila). O aumento do LL não foi linear, sendo praticamente constante (37%) até um teor de 10% de CCA e atingindo um LL de 45% para um teor de 20% de CCA. O LP apresenta um aumento linear, sendo de 14% para o solo natural e de 34% quando é adicionado 20% de CCA. A redução do IP é consequência do maior aumento do LP respeito ao LL. Os autores concluem que os teores ótimos de CCA para reduzir a plasticidade do solo são de 10 a 15%.

Muntohar e Hantoro (2000) obtiveram resultados diferentes quando pesquisaram os efeitos da estabilização com CCA e cal nas propriedades de um solo silto-argiloso (91% de fração fina) com IP de 41%. O IP diminuiu quando o teor de cal aumenta, devido a uma redução do LL e um aumento do LP. O solo estabilizado com CCA apresentou uma queda do LL de 74% para 65%, independentemente do teor de CCA adicionado. No entanto, o LP aumentou quando adicionado 2% de cal, permanecendo quase constante para teores de cal maiores.

Os mesmos autores observaram que a densidade real dos grãos (G) decresce à medida que é adicionada CCA, o mesmo acontecendo ao fixar-se o teor de CCA e aumentar-se o teor de cal. Porém, a diminuição da G devida à adição de CCA não foi muito significativa, sendo da ordem de um 2 a 3%. A maior queda das G observadas foi devida à adição de cal, passando de 2,63 para o solo natural para 2,53 para a mistura de solo e 12% de cal.

Mesmo comportamento plástico é verificado por Basha *et al.* (2003) para o caso de estabilização de uma bentonita com CCA e cimento. O IP diminuiu quando o teor de cimento aumentou. Além deste resultado, os autores observaram que na mistura caolinita-CCA-cimento o LL se manteve constante, enquanto o LP aumentou com os teores de CCA e cimento. Como resultado, o IP diminuiu, concluindo os autores que o cimento e a CCA reduzem a plasticidade de todos os solos.

### 2.2.5.2 Características de Compactação

Diversos autores observam que misturas de solo-CCA-cal apresentam menor peso específico aparente seco máximo ( $g_{dmáx}$ ) e maior teor de umidade ótima ( $\omega_{ót}$ ) que o solo natural, para uma mesma energia de compactação. À medida que o teor de cal aumenta o  $g_{dmáx}$  continua diminuindo.

Ali *et al.* (1992) estudaram os efeitos da estabilização com CCA e cal ou cimento nos parâmetros de compactação de uma areia argilosa. Salientaram que o decréscimo de  $g_d$  da mistura solo-CCA é devido à densidade real dos grãos (G) relativamente baixa da CCA. O incremento do  $\omega_{ót}$  poderia ser causado pela absorção de água pela CCA. Os autores observaram que para um dado teor de CCA, a adição de cal produz uma diminuição do  $g_{dmáx}$  da mistura solo-CCA-cal e um aumento do  $\omega_{ót}$ . Como resultado da combinação dos efeitos da CCA e da cal, o  $g_{dmáx}$  diminuiu fortemente de um valor de 16 kN/m<sup>3</sup> para uma mistura solo-6%CCA até um valor de 14 kN/m<sup>3</sup> para uma mistura solo-18%CCA-9%cal. A  $\omega_{ót}$  aumentou de 18% para 24,5%. Os autores assinalam que a presença de CCA além da quantidade requerida para as reações com a cal poderia ter reduzido o  $g_{dmáx}$ .

Para Zhang *et al.* (1996), o aumento do  $\omega_{ót}$  com o aumento dos teores de cimento e CCA adicionados a um solo seria causado por duas razões. Parte da água adicionada fica retida na estrutura floclada do solo resultante da interação cimentícia. Outra parte da água é absorvida pela CCA, decorrente de suas propriedades porosas.

Rahman (1987) salienta que o decréscimo do  $g_d$  se deveria à influência da baixa massa específica da mistura solo-CCA-cimento e à floclação que causa texturas mais grossas com partículas que ocupam espaços maiores.

### 2.2.5.3 Comportamento Tensão-Deformação

Muntohar e Hantoro (2000) constataram um comportamento tensão-deformação no ensaio triaxial mais rígido do solo argiloso, com 81% de silte e 10% de argila,

quando estabilizado com cal e CCA mais cal. A tensão de ruptura foi maior para as misturas solo-CCA-cal em relação ao solo natural, sendo de 600 kPa para a mistura solo-10%CCA-10%Cal e de 140 kPa para o solo argiloso. As deformações unitárias axiais ( $\epsilon_r$ ) correspondentes a essas rupturas foram respectivamente de 4% e 10%. Portanto se produziu um aumento considerável dos módulos de elasticidade (E) com a estabilização do solo com CCA mais cal.

Os autores mostram que as misturas solo-CCA-cal são mais rígidas que as misturas solo-cal. Assim, para a mistura solo-10%Cal a tensão de pico foi de 300 kPa, menor que a mesma tensão para a mistura solo-10%CCA-10%Cal. No entanto, a deformação de ruptura da mistura solo-10%Cal foi algo superior à da mistura solo-10%CCA-10%Cal. Portanto o E passou de 6 MPa na mistura solo-cal para 15 MPa na mistura solo-CCA-cal. Ao aumentar os teores de CCA e cal para 12,5% e 12% respectivamente, o módulo de elasticidade aumentou, devido a uma diminuição da tensão de ruptura para 480 kPa e um aumento da deformação de ruptura para 2%, dando como resultado um módulo de 24 MPa.

No entanto o solo argiloso mostrou um comportamento tensão-deformação de tipo dútil, as misturas solo-CCA-cal e solo-cal mostraram ruptura frágil, com fortes quedas de resistências após da tensão de pico.

#### 2.2.5.4 Resistência

Ali *et al.* (1992) pesquisaram a evolução da resistência à compressão simples (RCS) com a estabilização de uma areia argilosa com CCA e cal após de 7, 28 e 56 dias de cura. Observaram um padrão geral segundo o qual a RCS aumenta rapidamente com a adição da CCA até atingir um máximo, além do qual incrementos de teor de CCA produzem diminuição da RCS. Assim, aos 7 dias de cura, para 3% de cal a máxima RCS (0,9 MPa) foi atingida com 12% de CCA; para 6% a máxima RCS (0,9 MPa) foi atingida com 6% de CCA e para 9% de cal a máxima RCS (1 MPa) com 18% de CCA. Difractogramas de raios-X feitos em amostras curadas por 7, 28 e 90 dias, manifestaram geração de compostos de silicatos hidratados de cálcio (CSH), aluminatos hidratados de

cálcio (CAH) e alumino-silicatos hidratados de cálcio (CASH), da mesma forma que acontece nas reações pozolânicas da cal com solos argilosos.

Segundo os autores, a queda de resistência que ocorre para teores de CCA além do ótimo é atribuída à diminuição do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  da mistura como resultado da presença de CCA além da quantidade necessária para as reações com a cal disponível.

Os resultados dos ensaios de RCS da pesquisa de Ali *et al.* (1992), mostram que a resistência das misturas solo-cal pode ser aumentada adicionando entre 6 e 12% de CCA. Também inferiu-se que as misturas solo-CCA-cal exigem menor quantidade de cal para atingir uma resistência dada em comparação com misturas solo-cal.

Muntohar e Hantoro (2000), ao estudarem o comportamento do solo argiloso estabilizado com CCA e cal, obtiveram as máximas RCS com 10% de cal. A RCS do solo natural que era 500 kPa, com 10% de cal aumentou para 1300 kPa. Quando foi adicionada CCA no teor de 7,5% a RCS praticamente não se alterou. Entretanto alcançou 4200 kPa com um teor de CCA de 10%, caindo para 3000 kPa para um 12,5% de CCA. Os autores concluem que a máxima RCS foi atingida para a mistura solo-10%CCA-10%cal.

Para o caso do solo silto-arenoso estabilizado com cimento, Basha *et al.* (2005) observaram um fraco ganho de resistência das misturas solo-CCA, devido à ausência de propriedades pozolânicas da CCA. Portanto, a CCA não pode ser usada por sim só para estabilizar solos (Hossain, 1986). A pesquisa de Basha *et al.* (2005) mostra que a RCS de misturas solo-cimento pode ser aumentada adicionando entre 15 e 20% de CCA. Assim, enquanto a RCS da mistura solo-4%cimento foi de 0,2 MPa, a RCS da mistura solo-15%CCA-4%cimento foi de 0,95 MPa e da mistura solo-20%CCA-4%cimento foi de 1,1 MPa. A RCS do solo residual estabilizado com 4% de cimento e 20% de CCA foi 4 vezes maior que a amostra com 8% de cimento e 20% de CCA. Os autores concluíram que um teor menor de cimento é necessário para atingir-se uma dada RCS em comparação com o solo estabilizado com cimento. Sendo o cimento mais caro que a CCA, quanto menor a quantidade de cimento necessária para atingir-se uma dada resistência, tanto menores custos de construção.

Ali *et al.* (1992) constataram que o máximo valor da RCS de uma areia argilosa estabilizada com CCA e cal variou notavelmente com o aumento do tempo de cura.

Além disso, com o aumento dos teores de CCA a taxa inicial de desenvolvimento de resistência foi maior. Para um 6% de cal, a adição ao solo de um 6% de CCA gerou um aumento de resistência de 35% quando o tempo de cura passou de 7 para 28 dias a 30°C, enquanto 9% de CCA produziu um aumento de 49%, com o mesmo tempo de cura. A taxa de incremento de resistência diminuiu para tempos de cura maiores. Os autores salientam que o desenvolvimento da RCS com o tempo de cura oferece um fator de segurança considerável para pavimentos dimensionados a partir da resistência da mistura aos 7, 28 ou 56 dias.

Ali *et al.* (1992) compararam o ganho da RCS do solo areno-argiloso estabilizado com misturas CCA-cal e misturas CCA-cimento, fixando em 12% o teor de CCA. Observaram que a cal propicia maiores ganhos de resistência do que cimento nas misturas solo-CCA, para períodos de cura de 7 e 28 dias. Assim, a RCS aos 28 dias de cura, de uma mistura de solo mais 12% de CCA e 3% de cal era 40% superior do que a correspondente mistura de solo mais 12% de CCA e 3% de cimento. Por outro lado, para atingir uma RCS de 1,1 MPa aos 28 dias de cura, foi necessário adicionar um teor de 6% de cimento e um teor de 3% de cal.

Ali *et al.* (1992) analisaram também a influência da temperatura de cura na RCS da areia argilosa estabilizada com diferentes teores de CCA e 6% e 9% de cal. As misturas foram curadas úmidas em um forno durante 28 dias, onde foi mantida uma circulação de ar forçada a 60°C. Em tais condições de cura, as máximas RCS corresponderam a um teor de CCA de 6%, para ambos os teores de cal analisados. Os valores das máximas RCS das misturas solo-6%CCA-6%cal e solo-6%CCA-9%cal para a temperatura de 60°C foram de 2,1 MPa e 2,6 MPa respectivamente, enquanto para a temperatura de cura de 30°C os valores medidos das RCS foram de 1,2 MPa e 1,5 MPa respectivamente. Os autores salientam que o aumento da temperatura de cura resulta em um desenvolvimento da RCS do solo tratado com CCA e cal.

Rahman (1986) estabilizou com CCA, cal e cimento, um solo laterítico A-7-6, com uma RCS natural de 211 kPa. As misturas solo-CCA apresentaram pequenos ganhos de RCS com 1 dia de cura, até atingir um máximo valor de 416 kPa para um teor de CCA de 20%, além do qual a RCS diminuiu. O pequeno aumento da RCS das misturas solo-CCA obtido por Rahman (1986), em comparação com as misturas solo-

cal e solo-cimento, confirmaria o baixo efeito pozolânico, portanto na coesão, da CCA e dever-se-ia à influência do ângulo de atrito interno (Muntohar e Hantoro, 2000).

Muntohar e Hantoro (2000) determinaram o ISC de um solo argiloso estabilizado com CCA e cal. O solo natural apresentou um ISC de 3%, atingindo o valor máximo de 17% ao acrescentar-se 6% de cal, independente do teor de CCA utilizado. Para teores de cal superiores a 6% o ISC diminuiu de forma contínua para qualquer teor de CCA acrescido. Portanto, os valores de ISC obtidos para os diferentes teores de CCA, mantendo-se o teor de cal constante, não diferiram significativamente.

Rahman (1986), analisando os efeitos separados da CCA, a cal e o cimento no ISC do solo laterítico (A-7-6), constatou que os ISC das misturas solo-CCA aumentaram linearmente para teores de CCA entre 0 e 12%, com valores de ISC entre 8% e 44% respectivamente, atingindo um máximo valor de 76% para um teor de CCA de 18%. Para misturas solo-cal o máximo ISC foi de 60% para um 5% de cal, enquanto, quando cimento é acrescentado ao solo, os valores de ISC foram muito maiores, não atingindo um máximo. Assim o ISC é 99% para um teor de cimento de 8%. O autor conclui que o solo laterítico apresenta um melhoramento para os três estabilizantes, mas não comenta as possíveis razões do aumento no ISC das misturas solo-CCA.

Por sua vez, Basha *et al.* (2005) observaram uma diminuição dos valores de ISC das misturas solo silto arenoso-CCA, passando de 4% para o solo natural para 2% para a mistura solo-5%CCA. Para os autores, os resultados demonstra-iam que a CCA não é apropriado como estabilizante por si só, enquanto que misturas de solo, CCA e cimento produzem significativos aumentos de ISC. Os autores assinalam que valores máximos de ISC de 60% e 50% são obtidos para teores de CCA e cimento de 5%-4% e 20%-8% respectivamente; sendo máximo o valor de ISC para os teores de 5%-4%.

#### 2.2.5.5 Durabilidade

Ali *et al.* (1992), efetuaram ensaios de molhagem e secagem de misturas de arena argilosa com CCA e cal, seguindo o procedimento sugerido por Hoover *et al.* (1958). Observaram que as RCS dos corpos-de-prova com três diferentes composições

(9% cal+0% CCA, 9% cal+12% CCA, 9% cal+18% CCA) e tempos de cura de 28 dias, após de serem submetidas a 12 ciclos de molhagem e secagem caíram respectivamente para 32%, 60% e 57% das RCS dos corpos-de-prova não submetidos a ciclos. A amostra com um teor de CCA de 12% conservou a maior resistência após os ciclos de molhagem e secagem. Os autores assinalam que comparando as razões de RCS, a adição de CCA melhora a durabilidade de solos estabilizados com cal.

Ali *et al.* (1992) observam um padrão geral segundo o qual a resistência diminui drasticamente após o primeiro ciclo, melhorando para ciclos posteriores. Assinalam que este padrão poderia ser causado pela combinação da degradação induzida pelos ciclos de molhagem e secagem e o ganho de resistência devida ao tempo de cura.

Basha *et al.* (2005), analisaram a evolução da RCS de misturas do solo silto arenoso estabilizado com 5 diferentes teores de CCA e 4% de cimento em corpos-de-prova moldados e curados por 7 dias, e depois submersos mais outros 7 dias. A razão entre a RCS dos corpos-de-prova com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de CCA submersos com a RCS dos corpos-de-prova com iguais teores de cimento e CCA, porém não submersos foi respectivamente de 89%, 75%, 95%, 89%, 83% e 57%. Misturas com 5%, 20% e 25% de CCA apresentaram maiores reduções de resistência em comparação com a mistura solo-cimento. Contudo, os autores salientam que as resistências obtidas nas misturas solo-cimento-CCA são superiores às correspondentes misturas solo-cimento.

## 2.2.6 Comentário final

A casca de arroz é o subproduto residual agroindustrial com maior teor de sílica, sendo problemática sua deposição final. O tratamento da casca de arroz, mediante a incineração, de modo a reduzir os volumes de resíduo a ser depositado ou bem para sua reutilização em diversos processos industriais, produz um novo subproduto residual: a CCA. Continua sendo um problema a deposição final deste subproduto residual, sendo uma alternativa de solução seu aproveitamento em diversos processos, por exemplo, como agente estabilizante de solos.

A CCA é uma fonte de sílica para solos com baixos teores deste mineral, tornando possível a estabilização com cal ou cimento de solos arenosos ou siltosos, com menores custos que quando estabilizados apenas com cimento.

A eficácia deste método de estabilização foi demonstrada por vários autores, em pesquisas desenvolvidas principalmente na Ásia e na África. No continente sul-americano, onde os processos industriais de arroz têm sido historicamente consideráveis no Brasil e vem desenvolvendo-se no Uruguai, não existe experiência no uso da CCA na estabilização de solos.

Geralmente, os solos utilizados nas pesquisas são areias e siltes, porém há estudos desenvolvidos com solos argilosos. Nestes casos, os autores não esclarecem qual é a contribuição das CCA nas modificações das propriedades dos solos estabilizados e qual o da cal ou cimento.

Algumas pesquisas de estabilização de solos só com CCA, também têm sido desenvolvidas (Rahman, 1986). As melhorias verificadas pelo autor na resistência do solo, classificado como A-7-6, seriam devidas mais a efeitos de correção granulométrica do que propriamente a reações pozolânicas que não podem acontecer na ausência de cálcio ou magnésio livre. Segundo Muntohar e Hantoro (2000) o aumento na resistência à compressão simples de solos estabilizados com CCA, é devido ao efeito no ângulo de atrito interno da mistura solo-CCA, e não à ocorrência de reações pozolânicas.

A bibliografia consultada dedica escassa atenção à influência da temperatura de incineração da casca de arroz nas propriedades das CCA e nos efeitos nas reações pozolânicas com a cal. O volume de CCA necessário para desenvolver tais pesquisas, que obrigam à disponibilidade de fornos de grande volume de queima e especiais pelas características abrasivas da sílica da casca de arroz, talvez seja a razão de tais lacunas.

Resulta de muito interesse pesquisar a atividade pozolânica da CCA em função da temperatura de incineração da casca de arroz. Esta abordagem, ainda em forma elementar, talvez seja a mais relevante contribuição ao avanço do conhecimento da estabilização de solos com CCA e cal.

### 3 METODO E MATERIAS UTILIZADOS

#### 3.1 METODO

A principal hipótese a testar na pesquisa foi verificar a que a estabilização de solos arenosos com cinza de casca de arroz e cal produz materiais mais resistentes e duráveis e menos deformáveis que o solo natural, visando sua utilização em camadas de pavimentos de baixo a mediano volume de tráfego.

Dois tipos de cinzas de casca de arroz foram utilizados na pesquisa. Um primeiro tipo é definido de CCA residual (CCAr), por ser um produto residual de um processo industrial, para o caso uma CCA resultante da queima de casca num forno, sem controle de temperatura, durante o processo de parboilização do arroz. Um segundo tipo, denominado de CCA a temperatura controlada (CCA<sub>TC</sub>), produzido no laboratório mediante incineração de casca numa mufla, com controle rigoroso da temperatura.

As propriedades da CCA dependem significativamente do processo de queima da casca, particularmente da temperatura e tempo de incineração, do tempo de resfriamento e da moagem. Destas, na pesquisa só foi considerada a temperatura como variável principal controlável. De este modo o número de ensaios foi reduzido consideravelmente, adequando seu número aos prazos da pesquisa. A temperatura controlada de incineração da casca no laboratório foi um fator fixo a quatro níveis: 500°C, 650°C, 800°C e 900°C. O valor limite inferior de temperatura foi definido considerando que corresponde a temperaturas que produzem a queima da matéria orgânica. A temperatura limite inferior para garantir a eliminação quase total da matéria orgânica seria da ordem de 500°C, por quanto o limite de temperatura para a passagem do estado amorfo para o estado cristalino das cinzas estaria no entorno dos 800 – 900°C.

As variáveis dependentes na análise das características das CCA são: o teor de matéria orgânica e a composição e estrutura mineralógica, esta última definida qualitativamente pela presença ou não de picos nos difratogramas de raios-X.

Nas misturas de solo com CCAr e com cal as variáveis dependentes foram: composição mineralógica, módulo de deformabilidade secante, resistência à compressão

simples, resistência à tração por compressão diametral e durabilidade. A capacidade de suporte (ISC) foi medida como indicativo do efeito da estabilização.

Para o caso das misturas de solo com CCAr e com cal foram identificadas seis variáveis principais controláveis: teor de CCAr e de cal, tempo e temperatura de cura, peso específico seco e teor de umidade de compactação, tempo de espera entre a mistura e a compactação. O teor de CCAr e de cal foi um fator fixo a três níveis: 15% de CCAr + 5% de cal, 20% de CCAr + 5% de cal, 20% de CCAr + 10% de cal. Foram adotados teores elevados de CCAr e de cal, devido à hipótese de que a CCAr utilizada na pesquisa é de baixa atividade pozolânica.

O tempo de cura foi um fator fixo a quatro níveis para os ensaios de resistência à compressão simples: 7, 14, 28 e 56 dias. Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, partindo da hipótese da baixa atividade pozolânica da CCAr, foram considerados três tempos de cura: 14, 28 e 56 dias. A análise da composição mineralógica por difratometria de raios-X e a durabilidade foi realizada só para um tempo de cura de 28 dias. A temperatura de cura foi, para todos os ensaios, um fator fixo a um nível: temperatura ambiente de 20°C.

O peso específico seco e o teor de umidade de compactação foi um fator fixo a um nível, correspondendo aos parâmetros ótimos de compactação da mistura de solo com 20% de CCAr e com 10% de cal: peso específico seco máximo e teor de umidade ótimo do ensaio de Proctor na energia normal. O tempo de espera entre a mistura e a compactação foi um fator fixo a quatro níveis para o ensaio de resistência à compressão simples: 0, 1, 2, 3 e 4 horas. Para a análise da composição mineralógica e os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e de durabilidade, o tempo de espera e foi um fator fixo a um nível: compactação imediatamente após a mistura (0 hora).

Nas misturas de solo com CCA a temperatura controlada ( $CCA_{TC}$ ) e com cal as variáveis dependentes foram: composição mineralógica, módulo de deformabilidade secante, resistência à compressão simples.

Para o caso das misturas de solo com  $CCA_{TC}$  e com cal foram consideradas seis variáveis principais controláveis: temperatura de incineração controlada da casca de arroz, teor de CCAr e de cal, tempo e temperatura de cura, peso específico seco e teor de umidade de compactação. A temperatura de incineração controlada da casca de arroz

foi um fator fixo a dois níveis: 650°C, 800°C. O teor de CCAr e de cal, o tempo e temperatura de cura, o peso específico seco e teor de umidade de compactação foram fatores fixos a um nível: 15% de CCA<sub>TC</sub> + 5% de cal, curadas 28 dias a temperatura ambiente de 20°C e compactados a peso específico seco máximo e teor de umidade ótimo na energia normal do ensaio Proctor correspondente à mistura de solo com 20% de CCAr e com 10% de cal. O efeito do tempo de espera entre a mistura e a compactação não foi analisado na pesquisa para as misturas com CCA<sub>TC</sub>.

### 3.1.1 Preparação da cinza de casca de arroz a temperatura controlada

A casca de arroz foi incinerada a temperaturas controladas de 500°C, 650°C, 800°C e 900°C, em uma mufla (forno de pequena capacidade volumétrica para uso laboratorial, na qual é possível atingir temperaturas elevadas, da ordem de 1000 °C) pertencente ao Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial (IIMPI) da Facultad de Ingeniería da Universidad de la República, Uruguai, mostrada na Figura 3.1.



Figura 3. 1 - Mufla para a incineração da casca de arroz a temperaturas controladas.

Dada a pequena dimensão da mufla e a baixa densidade específica da casca de arroz, o processo de queima foi feito em turnos, de forma a atingir os volumes totais requeridos pelas análises e ensaios. Em cada turno entre 30 e 40 g de casca de arroz foram colocadas em uma vasilha de porcelana, como mostra a Figura 3.2. Precisaram-se, no total, 23 turnos. Adotou-se um tempo de 4 horas para todas as temperaturas de incineração e para todos os turnos.



Figura 3. 2 - Vista da mufla durante a incineração da casca de arroz.

A casca de arroz antes de cada turno de incineração e a cinza de casca de arroz depois da incineração, foram pesadas com precisão de 0,01 g. Uma vez colocada a casca de arroz na vasilha de porcelana na mufla, ligou-se a mufla, permitindo subir a temperatura até o valor desejado. Ao final do processo, após das 4 h, a cinza produzida se deixou esfriar ao ar.

### 3.1.2 Dosagem e Mistura

Três combinações de teores de CCA residual do processo de parboilização do arroz e cal foram adotadas. Para efeitos de comparação procurou-se manter constante um teor dos dois agentes estabilizantes entre duas combinações. Assim as combinações adotadas foram: 15% CCA+5% cal; 20% CCA+5% cal; 20% CCA+10% cal.

Para a análise da influência da temperatura de incineração da casca de arroz no comportamento mecânico das misturas, adotou-se uma única combinação: 15% de CCA a temperatura controlada + 5% de cal ( $15\text{CCA}_{\text{TC}}+5\text{Cal}$ ). Isto foi assim feito, devido às dificuldades em se produzir os volumes de  $\text{CCA}_{\text{TC}}$  mediante a incineração da casca de arroz com a mufla disponível (a cada 30 – 40 g de casca de arroz introduzidas na mufla, produziam-se 5 – 7 g de cinza).

O solo e a CCA residual (CCAr) foram secos ao ar no laboratório. A cal e as  $\text{CCA}_{\text{TC}}$  foram estocadas em sacos plásticos para mantê-las secas e, no caso da cal, isolada do ar para evitar a carbonatação. O solo, as CCA, a cal e a água, foram pesados com precisão de 0,01 g. Os teores de CCA e de cal se calcularam em relação ao peso de solo seco. Os teores de água foram calculados em função do peso seco da mistura. Inicialmente misturaram-se o solo, a CCA e a cal, no estado seco, realizando-se uma homogeneização manual da mistura. Logo após se acrescentou água garantindo a total homogeneidade da mistura e evitando perdas por evaporação.

Acabada a mistura, os corpos-de-prova foram imediatamente compactados, excetuando aqueles destinados ao estudo da influência do retardamento da compactação na resistência à compressão simples. Para esta última análise, deixaram-se as misturas em cura solta durante os tempos necessários (em sacos plásticos fechados) e logo após compactaram-se os corpos-de-prova.

Para preservar os teores de umidade e evitar a carbonatação da cal durante a cura, os corpos-de-prova após de misturados e moldados, foram armazenados em sacos plásticos.

### 3.1.3 Densidade real dos grãos

As densidades reais dos grãos do solo, da cal, da casca de arroz e da CCAr foram determinadas segundo o procedimento descrito pela norma AASTHO T100-86. Não foi possível determinar se a temperatura de incineração afeta a densidade real da cinza de casca de arroz, devido às dificuldades, já explicitadas, de produzir-se elevados volumes de  $\text{CCA}_{\text{TC}}$  com a mufla disponível.

### 3.1.4 Análise Granulométrica

A análise granulométrica do solo foi realizada de acordo com a norma AASTHO T88-86. Foi feita a análise por peneiramento e por sedimentação com uso do defloculante hexa-metafosfato de sódio.

### 3.1.5 Limites de Atterberg

O limite de liquidez (LL) do solo se determinou de acordo com a norma AASHTO T89-86 e o limite de plasticidade (LP) de acordo com o procedimento descrito na norma AASHTO T90-86.

### 3.1.6 Ensaios de Compactação

Para determinar os parâmetros ótimos de compactação se realizaram ensaios de compactação. Para o solo foram executados ensaios de compactação nas energias Normal (AASHTO T99-86) e Modificada (AASHTO T180 – 86).

Para as misturas solo-CCA-cal se realizaram ensaios de compactação na energia Normal, segundo a AASHTO T99-86, unicamente para o caso da mistura 20CCAr+10Cal. As outras misturas foram moldadas com os parâmetros ótimos correspondentes à mistura 20CCAr+10Cal, de modo de eliminar das análises as variáveis peso específico seco e teor de umidade. O ensaio se executou imediatamente após da mistura, sendo realizado em moldes de 15 cm de diâmetro interior.

### 3.1.7 Ensaios de Difractometria de Raios-X

Realizaram-se ensaios de difratometria de raios-X do solo, das cinzas de casca de arroz residual e a temperatura controlada, das três misturas solo-CCAr-cal para um período de cura de 28 dias e das duas misturas solo-CCA<sub>TC</sub>-Cal com 28 dias de cura.

Os princípios básicos da análise difratométrico foram expostos por Lovato (2004) em ocasião de sua dissertação de mestrado. Para o caso, só foram ensaiadas amostras em condição natural mediante o método do pó.

Para os ensaios de difratometria de raios-X foram utilizados dois difratômetros de raios-X. Os difratogramas de raios-x do solo, da cinza de casca de arroz residual e das misturas solo-CCAr-cal foram realizados em um difratômetro Philips X'Pert, modelo PW3710, com radiação CuKalfa, de comprimento de onda de 1,54056 Å, pertencente ao Instituto de Física da Facultad de Ciencias da Universidad de la República, Uruguai. Dificuldades surgidas durante o desenvolvimento da pesquisa, levaram a realizar os difratogramas de raios-X das cinzas de casca de arroz a temperatura controlada e das misturas solo-CCA<sub>TC</sub>-cal com um difratômetro de pó Seifert Scintag Pad II, com radiação CuKalfa, de comprimento de onda 1,5418 Å, pertencente ao Laboratorio de Cristalografía, Estado Sólido y Materiales da Facultad de Química, Universidad de la República, Uruguai.

As amostras para os difratogramas de raios-x de todas as misturas (com CCAr e CCA<sub>TC</sub>) foram obtidas dos corpos-de-prova moldados para os ensaios de resistência à compressão simples, imediatamente após serem ensaiados. Todas as amostras (as cinzas e as misturas), previamente a ser colocadas no difratômetro de raios-X ensaiadas, foram paradas mediante moagem em morteiro até reduzir o tamanho dos grãos de modo que toda a amostra passa-se a peneira No. 200. Após da moagem, uma amostra representativa de 2 g foi colocada no amostrador do difratômetro de raios-X.

### 3.1.8 Análise química

Foram realizados ensaios de calcinação de matéria orgânica a temperaturas de 500°C e 1000°C para a determinação de teor de carbono em amostras de CCAr e CCA produzidas por incineração a 500°C, 650°C, 800°C e 900°C.

Os teores de óxido de cálcio e de magnésio da cal utilizada foram determinados mediante análise química, visando também à verificação do tipo de cal. As análises químicas se executaram no Instituto de Ingeniería Química (IIQ) da Facultad de Ingeniería da Universidad de la República, Uruguai.

### 3.1.9 Ensaio de compressão simples

Realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples do solo, misturas solo-CCAr-cal com 7, 14, 28 e 56 dias de cura e misturas solo-CCA<sub>TC</sub>-cal com de 28 dias de cura. Levando em conta os prazos da pesquisa e as dificuldades para produzir CCA com a mufla disponível, apenas ensaiaram-se misturas com CCA<sub>TC</sub> incineradas às temperaturas de 650°C (15CCA<sub>TC650</sub>+5Cal) e 800°C (15CCA<sub>TC800</sub>+5Cal). Os corpos-de-prova se compactaram logo após da mistura.

Para analisar a influência na resistência à compressão simples da demora entre a mistura e a compactação, ensaios foram realizados em misturas de 20CCAr+10Cal com 28 dias de cura. Consideraram-se os seguintes tempos entre a mistura e a compactação: 1, 2, 3 e 4 h. Antes da compactação as misturas foram ensacadas para manter o teor de umidade.

Os ensaios de resistência à compressão simples executaram-se conforme a Norma AASHTO T208-70. Os corpos-de-prova foram compactados em moldes metálicos tripartidos, com 7,65 cm de altura e 3,72 cm de diâmetro interno. Aplicou-se o método estático de compactação, em três camadas, de forma de obter o peso específico seco máximo do ensaio de compactação na energia Normal, correspondente a cada corpo-de-prova (solo e 20CCAr+10Cal para todas as misturas solo-CCA-cal). Os corpos-de-prova do solo foram compactados no teor de umidade ótima do ensaio na

energia Normal, enquanto os corpos-de-prova das misturas solo-CCA-cal se compactaram no teor de umidade ótimo correspondente à energia Normal da mistura 20CCAr+10Cal. Tanto para o solo quanto para as misturas solo-CCA-Cal, os corpos-de-prova foram moldados em triplicata.

Depois de compactados, os corpos-de-prova foram retirados dos moldes, pesados e medidos com precisão de 0,01 g e 0,01 cm, respectivamente. Os corpos-de-prova das misturas solo-CCA-cal foram armazenados em sacos plásticos e deixados em câmara úmida, à temperatura constante, por 7, 14, 28 e 56 dias. Após do período de cura os corpos-de-prova foram pesados e medidos com a precisão anteriormente mencionada.

Os ensaios se realizaram em uma prensa com anel dinamométrico de capacidade máxima 50 kN, na modalidade de deformação controlada, com velocidade de 0,25 mm/min e conduzidos até se atingir a resistência última. Mediram-se a deformação axial, de modo de observar o comportamento tensão-deformação e determinar os módulos de deformabilidade secante.

### 3.1.10 Ensaio de tração por compressão diametral

Ensaio de tração por compressão diametral se efetuaram de acordo com o método DNER-ME 138/94, nas misturas solo-CCAr-cal, com tempos de cura de 14, 28 e 56 dias.

Os corpos-de-prova foram compactados em moldes cilíndricos de 10,14 cm de diâmetro interno e 6,39 cm de altura, imediatamente após a mistura. A compactação foi realizada de modo dinâmico, em três camadas, de modo de se alcançar o peso específico seco máximo correspondente à energia Normal da mistura 20CCAr+10Cal. O teor de umidade das misturas foi o ótimo do ensaio de compactação na energia Normal. Para as três combinações de misturas solo-CCA-Cal e para cada tempo de cura, os corpos-de-prova foram produzidos em triplicata.

Depois de compactados, os corpos-de-prova foram retirados dos moldes, pesados e medidos com precisão de 0,1 g e 0,1 cm, respectivamente, armazenados em

sacos plásticos e deixados em câmara úmida, à temperatura constante pelos tempos de cura correspondentes. Após o período de cura os corpos-de-prova foram pesados e medidos com a mesma precisão anterior.

Os ensaios foram realizados na mesma prensa utilizada para os ensaios de compressão simples (com anel dinamométrico de capacidade máxima 50 kN), sendo que o carregamento foi distribuído através de frisos curvos, conforme mostrado na Figura 3.3. Os ensaios se executaram na modalidade de deformação controlada, com velocidade de 0,25 mm/min e conduzidos até a ruptura dos corpos-de-prova.



Figura 3. 3 - Prensa para os ensaios de compressão simples e tração por compressão. À direita, detalhe do suporte para o ensaio de tração por compressão diametral.

A resistência à tração é calculada mediante a Equação 3.1 (Fonte: DNER-ME 138/94).

$$\text{RCD} = \frac{2 \times F}{100 \times p \times D \times h} \quad (3.1)$$

Onde:

RCD – resistência à tração por compressão diametral (MPa)

F – força aplicada (N)

D – diâmetro do corpo-de-prova (cm)

h – altura do corpo-de-prova (cm)

### 3.1.11 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) se realizaram em corpos-de-prova do solo compactados na energia Normal e Modificada e em corpos-de-prova da mistura 20CCAr+10Cal com um tempo de cura de 28 dias e parâmetros do ensaio de compactação na energia Normal, seguindo a Norma AASHTO T193-81.

Após a compactação, armazenaram-se as misturas nos moldes em sacos plásticos, que foram mantidos em câmara úmida durante 28 dias, evitando a perda de umidade e a carbonatação da cal. Depois dos 28 dias de cura, os moldes foram submersos em água potável por 96 horas.

Os ensaios foram realizados na modalidade de deformação controlada, mantendo-se a velocidade constante, até a penetração de 12,7 mm (0,5 polegadas) do pistão no corpo-de-prova.

### 3.1.12 Ensaio de Durabilidade

Os ensaios de durabilidade das misturas 15CCAr+5Cal, 20CCAr+5Cal, 20CCAr+10Cal, se realizaram aplicando o método Iowa, proposto por Hoover *et al.* (1958). Este método avalia a durabilidade a ciclos de molhagem e secagem, medindo-se a queda de resistência. Seis corpos-de-prova de 7,65 cm de altura e 3,72 cm de diâmetro foram moldados para cada uma das três combinações de misturas adotadas. Os corpos-de-prova foram compactados em moldes tripartidos, de modo estático, em três camadas, de forma de se atingir o peso específico seco máximo do ensaio de compactação na energia Normal da mistura 20CCAr+10Cal. Depois de compactados, os corpos-de-prova foram retirados dos moldes, pesados e medidos com precisão de 0,01 g e 0,01 cm, respectivamente e armazenados em sacos plásticos e deixados em câmara úmida, à temperatura constante, por 28 dias.

Logo após cura, 3 corpos-de-prova de cada combinação de mistura foram submetidos a 12 ciclos de molhagem e secagem. Cada ciclo compreendeu um período de 48 horas, sendo 24 de imersão em água potável e 24 de secagem ao ar. Os 3 corpos-

de-prova foram inicialmente imersos em água. Os outros 3 corpos-de-prova de cada combinação de mistura permaneceram armazenados nos sacos plásticos na câmara úmida durante os 12 ciclos. Após os ciclos, tanto os corpos-de-prova submetidos a ciclos como aqueles não submetidos a ciclos foram ensaiados à resistência à compressão simples. Na Figura 3.4 é mostrado o sistema utilizado para os ciclos de molhagem e secagem com os corpos-de-prova.



Figura 3. 4 - Dispositivo para processar os ciclos de molhagem e secagem do ensaio de durabilidade. Observam-se os corpos-de-prova.

O critério de avaliação de durabilidade relaciona a resistência dos corpos de prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem, com a resistência dos corpos de prova curados no mesmo tempo e não submetidos aos ciclos. Marcon (1977) admitiu que quando essa relação for superior a 80% pode-se considerar que o material apresenta uma boa durabilidade.

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

### 3.2.1 Casca de Arroz e Cinza de Casca de Arroz Residual

A casca de arroz e a cinza de casca de arroz, empregadas na pesquisa foram coletadas na planta de parboilização de arroz da empresa ARROZUR S.A. Esta planta é

a única do Uruguai que processa o arroz com uso de casca de arroz como combustível exclusivo para o forno de secagem do arroz. Assim, é o único sitio do país, onde é possível encontrar cinza de casca de arroz em grandes volumes, com o problema de sua deposição final.

A queima de casca de arroz no forno de secagem do arroz da ARROZUR não é feita à temperatura controlada. Segundo comentários dos responsáveis da produção da planta, as temperaturas de queima seriam superiores aos 1000°C. Observações feitas durante a pesquisa levam a supor que as temperaturas no forno não são homogêneas, podendo ser até muito variáveis nos distintos pontos do forno e durante o processo. Alias, verificou-se a presença de casca de arroz não queimada misturada com a cinza de casca de arroz coletada. O resultado seria uma cinza de casca de arroz residual de características heterogêneas. De todos os modos, esta CCA residual se utilizou na pesquisa por ser a única produzida em grandes volumes e ter características melhores que aquelas produzidas por queima a céu aberto.

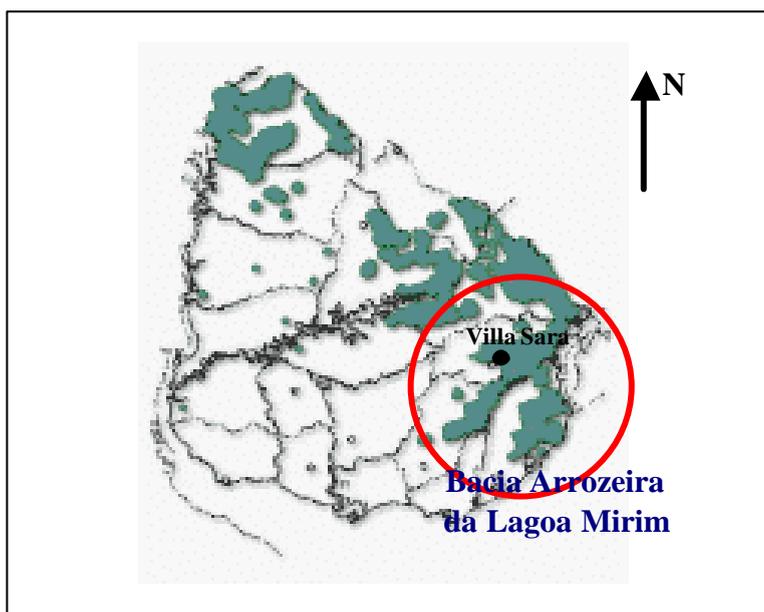


Figura 3. 5 - Áreas de cultivo de arroz em Uruguai e localização da bacia arrozeira da Lagoa Mirim e da localidade de Villa Sara.

(Fonte: ACA, 2006)

A planta da ARROZUR S.A. se localiza na Villa Sara, no Departamento de Treinta y Tres, ao leste do Uruguai. Nesta zona se desenvolve a chamada Bacia arrozeira da Lagoa Mirim, por estar localizada perto da Lagoa Mirim. A Bacia da Lagoa Mirim foi a primeira região de cultivo de arroz a se desenvolver no Uruguai, sendo atualmente a mais extensa em superfície e a de maior produção. A Figura 3.5 mostra as regiões de cultivo de arroz do Uruguai e localiza a bacia da Lagoa Mirim e o sitio de Villa Sara.

A casca de arroz foi coletada de uma pilha destinada ao forno de secagem dos grãos de arroz, localizada a céu aberto. A amostra de casca de arroz coletada não era limpa, apresentado-se misturada com folhas, talos, etc.

A cinza de casca de arroz, misturada com casca de arroz não incinerada, é retirada do forno mecanicamente e conduzida mediante esteiras sem-fim até piscinas de resfriamento. Depois de um tempo, a CCA é colocada em pilhas, esperando sua deposição final. Destas pilhas foi coletada a cinza de casca de arroz, em estado próximo à saturação. A Figura 3.6 mostra as pilhas de CCA da ARROZUR, onde também se podem observar as piscinas de resfriamento.



Figura 3. 6 - Pilhas de Cinza de Casca de Arroz obtidas da queima de casca de arroz do forno de ARROZUR.

A cinza de casca de arroz coletada tem forma folhada e cor preta, podendo ser classificada como cinza com alto teor de carvão (Houston, 1972). A presença de casca de arroz sem incinerar completamente e o cor da cinza, indicariam que a temperatura de incineração no forno de ARROZUR seria muito variável, sendo relativamente baixa a muito baixa em uma cosidervável extensão do mesmo. Outra explicação é que o tempo de incineração não seria o suficiente para permitir o desenvolvimento completo da combustão da matéria orgânica. Portanto, não sendo de se esperar uma elevada atividade pozolânica da CCA coletada, adotaram-se para a pesquisa de estabilização teores altos de CCA de 15% e 20%.

A densidade real dos grãos da casca de arroz coletada, medida no laboratório, é de 1,46, no entanto a da CCAr é de 1,81. No processo de incineração da casca de arroz, são volatilizados os elementos leves tais como a matéria orgânica, ficando aqueles mais densos como a sílica. Como resultado a densidade real dos grãos da cinza de casca de arroz é maior do que a da casca de origem.

Na Figura 3.7 é mostrada a distribuição granulométrica da casca de arroz e da cinza de casca de arroz residual (CCAr) sem moagem.

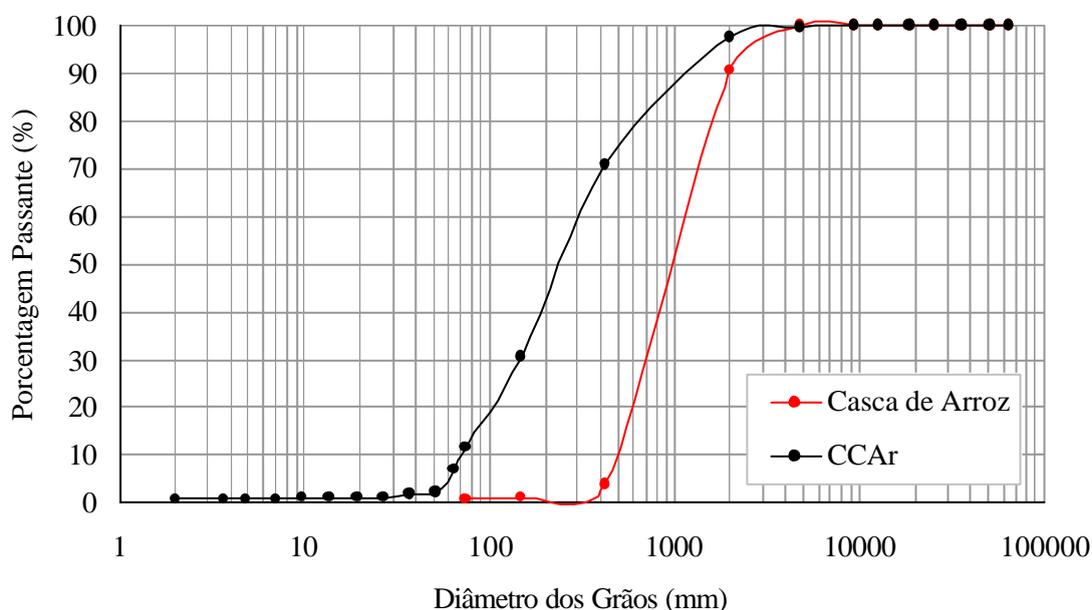


Figura 3. 7 – Distribuição granulométrica da casca de arroz e da CCAr.

Toda a amostra da casca de arroz passa na peneira No. 4 (100%), ficando retido na peneira No. 200 o 99,2% do total da amostra. Observa-se que a CCA residual da incineração dessa casca é pouco mais fina, com 11,8% passando na peneira No. 200. Da fração fina, 11%, corresponderia a tamanho silte, já que fica compreendida entre a peneira No. 200 e o tamanho de 2  $\mu\text{m}$ .

No Quadro 3.1 são mostrados os resultados da análise química de perdas de matéria orgânica por calcinação da CCA residual (CCAr) coletada.

Quadro 3. 1 – Perdas de matéria orgânica por calcinação da cinza da casca de arroz residual coletada em ARROZUR.

Perdas a 550°C (%)	Perdas a 1000°C (%)
18,1	18,7

Os resultados confirmam a presença de elevados teores de matéria orgânica na cinza de casca de arroz coletada para a pesquisa. Parte desta matéria orgânica poderia ter sido originada nas impurezas da casca de arroz queimada no forno. O teor de matéria orgânica seria da ordem de 18,7%, resultando ainda pontos pretos na amostra ao final da calcinação a 1000°C. A eficácia do forno da ARROZUR não é muito elevada, porém seu objetivo não é produzir cinza.

A Figura 3.8 apresenta o difratograma de raios-X da CCAr em estado natural, realizados com o difratômetro do Instituto de Física da Facultad de Ciencias. Observam-se picos pronunciados para os ângulos de difração ( $2\theta$ ) de 21,96°, 28,41°, 31,42°, 36,35°, 47,00°, 48,56° e 57,02°, característicos de um tipo de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) conhecida como cristobalita. O outro pico pronunciado, para  $2\theta$  de 26,62° é típico de carvão (C). O carvão é o produto da cristalização da matéria orgânica e sua presença poderia explicar a cor preta da cinza e os pontos remanentes ao final da calcinação a 1000°C. Portanto, a CCAr da pesquisa está constituída principalmente de cristobalita e, em menor medida, de carvão.

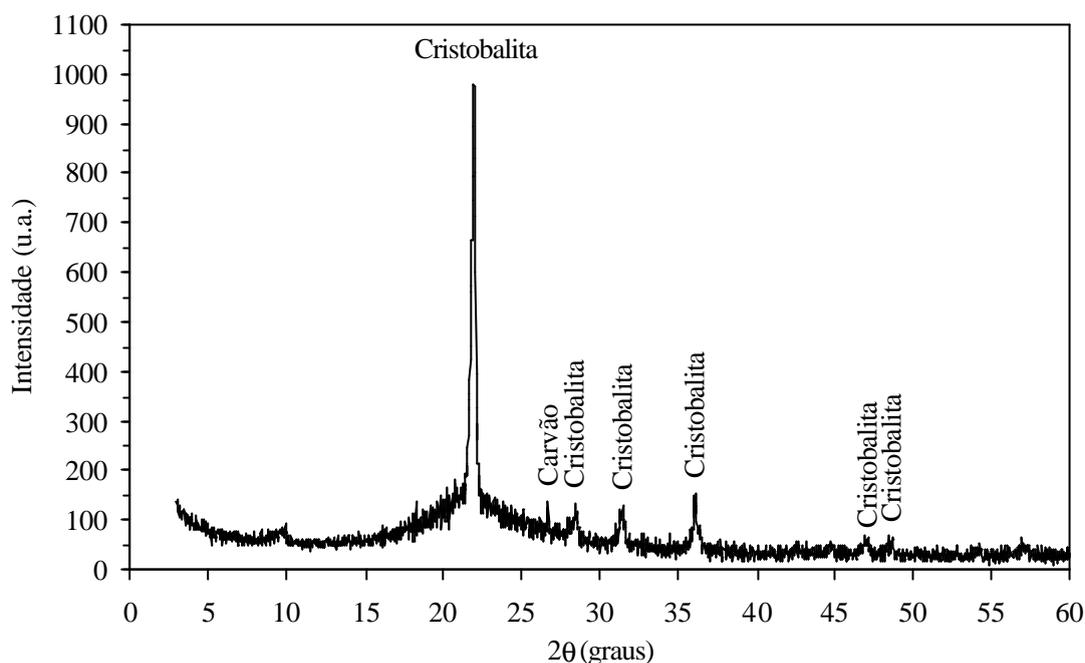


Figura 3. 8 - Difratograma de raios-X da amostra de cinza de casca de arroz residual de ARROZUR na condição natural.

Os picos de cristobalita observados no difratograma de raios-X, indicariam presença de sílica em estado cristalino na CCAr, o que afeta sua atividade pozolânica.

O padrão do difratograma de raios-X é muito similar ao apresentado por Rodríguez (2000) para uma amostra de CCAr, originada na mesma planta de ARROZUR, embora com um deslocamento sistemático em  $2\theta$ . Este deslocamento foi devido a erro sistemático no funcionamento do difratômetro utilizado. Este erro sistemático não implicou dificuldade alguma na interpretação do padrão da CCAr da pesquisa, porém como serão comentado mais adiante foi a causa das dificuldades de interpretação dos padrões das misturas solo-CCAr-cal.

O resultado apresentado na Figura 3.8 comprova a acurácia do ensaio, e que a mineralogia das cinzas produzidas não muda com o tempo. A única diferença estaria na maior ou menor presença de carvão nas amostras analisadas.

Ali *et al.* (1992) determinaram um difratograma de raios-X diferente do mostrado na Figura 3.8, para o caso de uma CCA resultante da queima de casca de arroz em pilhas na Malásia. Os autores observaram um padrão difratométrico com só dois

picos, correspondentes a dois tipos de sílica: quartzo e tridimita. O método de incineração tem influência na mineralogia das cinzas de casca de arroz.

### 3.2.2 Solo

Procurou-se um solo arenoso por ser o mais adequado à estabilização com CCA e cal. Pensando em uma aplicação prática da pesquisa, o mais recomendável seria empregar um solo da região da bacia arrozeira da Lagoa Mirim. Porém, por razões de tempo e de economia, o solo arenoso utilizado foi coletado na jazida Pérez Bustos, situada na localidade de Rincón de la Bolsa, no Departamento de San José, distante 24 km do centro de Montevideú. A Figura 3.9 mostra a localização da jazida.



Figura 3. 9 - Plano de localização da Jazida Pérez Bustos.

Na frente da jazida são identificáveis três formações geológicas, tal como se observa na Figura 3.10. O horizonte superior é composto por um solo silto-argiloso de cor marrom, correspondente à Formação Dolores. Seguem em profundidade dois horizontes de arenitos, correspondentes, de cima para baixo, à Formação Chuy e à Formação Raigón. O solo selecionado para a pesquisa pertence à Formação Chuy, que segundo a Carta Geológica do Uruguai (Preciozzi et al., 1985), formou-se no período

Quaternário e se caracteriza como um sedimento arenoso e argilo-arenoso fino a médio de cor branca, amarela e vermelha. A sedimentação é marinha. O solo foi coletado de uma pilha da jazida, tal como se pode observar na Figura 3.11.



Figura 3. 10 - Perfil da frente da Jazida Pérez Bustos.



Figura 3. 11 - Solo coletado na Jazida Pérez Busto.

Segundo a Carta de Reconhecimento de Suelos do Uruguai (Durán *et al.*, 2001), o solo pode ser classificado pedologicamente como um arenossolo ócrico. Este tipo de solo também pode ser identificado na região da bacia arrozeira da Lagoa Mirim, associado a gleys da Unidade Laguna Merín (Durán *et al.*, 2001). Portanto, os resultados da pesquisa de estabilização com CCA e cal do solo coletado poderão ser úteis, em termos de sua aplicação na região da bacia arrozeira da Lagoa Mirim.

A distribuição granulométrica de três amostras do solo está apresentada na Figura 3.12. Verifica-se que o solo é granular (92,1% de areia, 1,4% de pedregulho), com 6,5% de fração fina passante na peneira No. 200, sendo por 5,6% de argila e 0,9% de silte. Os resultados dos ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade indicam que a fração passante na peneira No. 40 é não plástica (IP = 0).

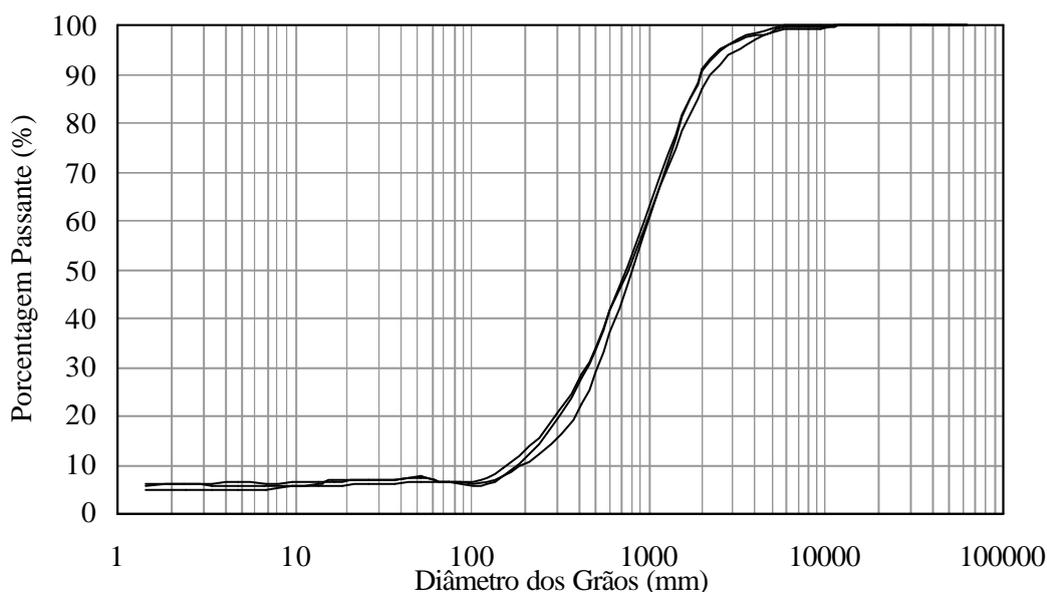


Figura 3. 12 - Distribuição granulométrica do solo.

O solo é classificado segundo o sistema unificado de classificação de solos da ASTM como SW-SM (areia bem graduada com silte) e segundo o sistema AASHTO como A-1-b (0).

Na Figura 3.13 é apresentado o difratograma de raios-X do solo arenoso da Jazida Pérez Bustos. Observa-se um pico de grande intensidade para o ângulo de

difração ( $2\theta$ ) de  $26,75^\circ$ , outro pico de menor intensidade para  $2\theta$  de  $20,95^\circ$ , e picos menores, característicos do quartzo. Na fração fina do solo é identificada montmorilonita e, em menor medida, caolinita. A montmorilonita se define pelos picos ocorrentes a  $2\theta$  de  $19,95^\circ$ ,  $35,05^\circ$  e  $54,28^\circ$ , no entanto a caolinita apresenta um pico de alta intensidade para  $2\theta$  de  $28,9^\circ$  e outro muito menor para  $2\theta$  de  $14,2^\circ$ .

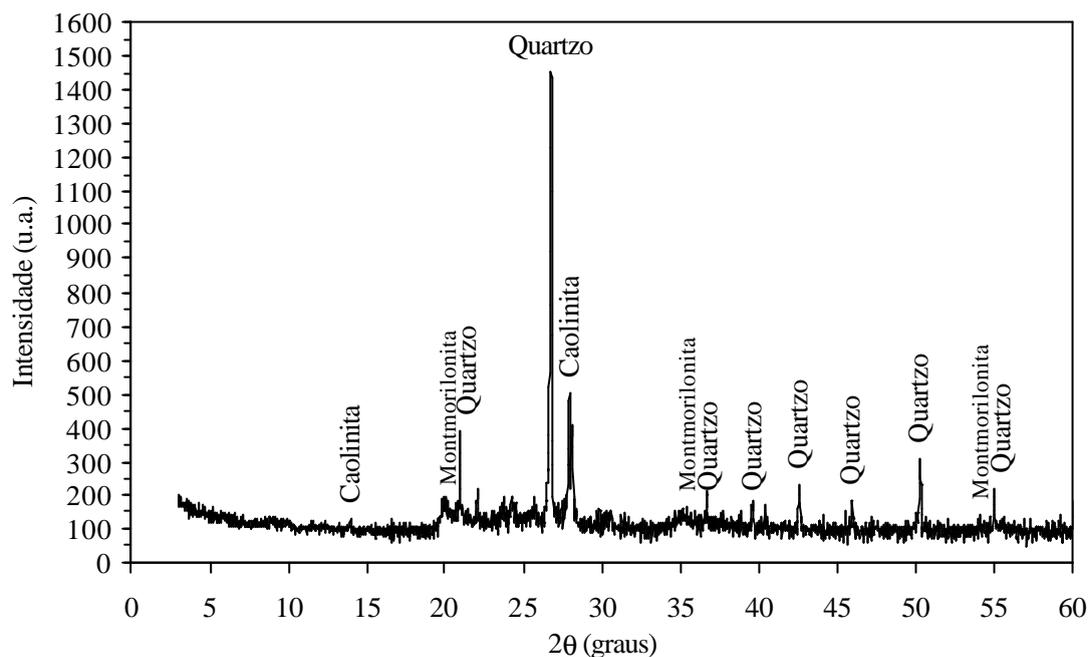


Figura 3. 13 - Difratograma de raios-X do solo na condição natural.

As curvas de compactação do solo para as energias Normal e Modificada são mostradas na Figura 3.14. Pode-se observar que a eficiência da compactação dinâmica do ensaio é muito baixa, própria de solos arenosos. Não existem diferenças notáveis das curvas para as duas energias de compactação. Os valores de peso específico seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e umidade ótima ( $\omega_{\acute{o}t}$ ), para as energias normal e modificada são respectivamente:  $\gamma_{dm\acute{a}x} = 17,4 \text{ kN/m}^3$  e  $\omega_{\acute{o}t} = 5,5\%$ ;  $\gamma_{dm\acute{a}x} = 17,5 \text{ kN/m}^3$  e  $\omega_{\acute{o}t} = 5,0\%$ .

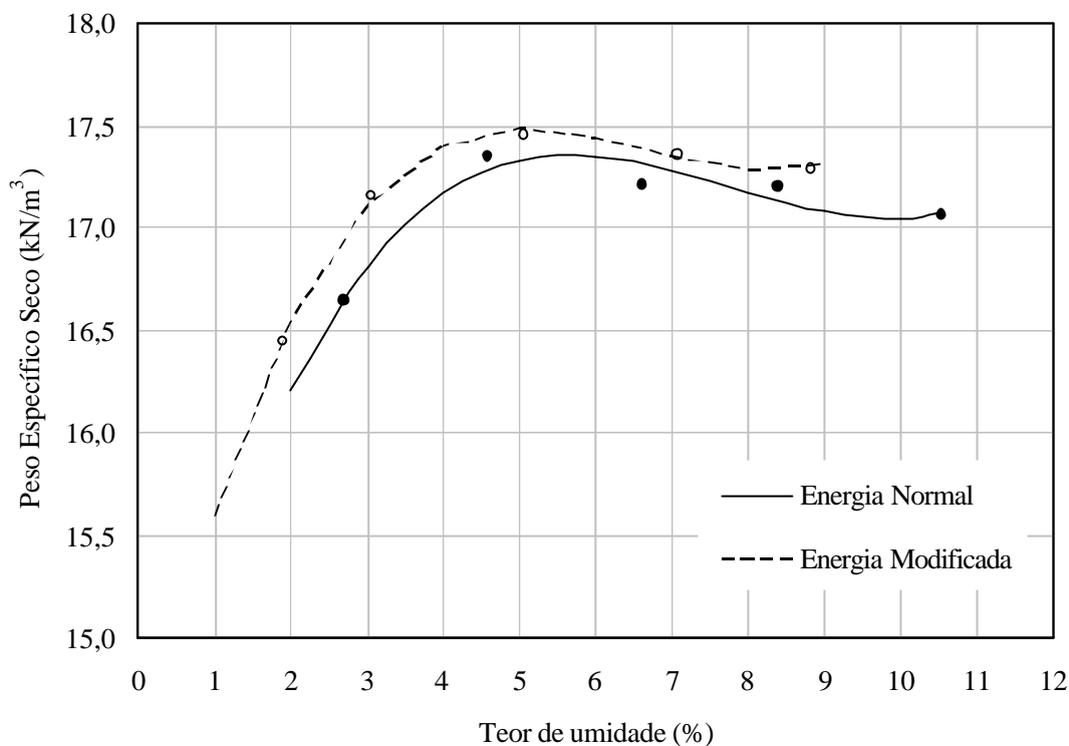


Figura 3. 14 - Curvas de compactação do solo.

Na Figura 3.15 são apresentadas as curvas do Índice de Suporte Califórnia (ISC) para as energias de compactação Normal e Modificada. Cada ponto das curvas corresponde a um ponto das curvas de compactação mostrados na Figura 3.13. Para os pesos específicos secos máximos e os teores de umidade ótimos de compactação às energias normal e modificada, os ISC do solo se podem considerar praticamente iguais, sendo os valores obtidos respectivamente: 9% e 5%. Segundo os critérios adotados na prática da pavimentação o solo não seria adequado para camadas de sub-base e base, dado o baixo ISC.

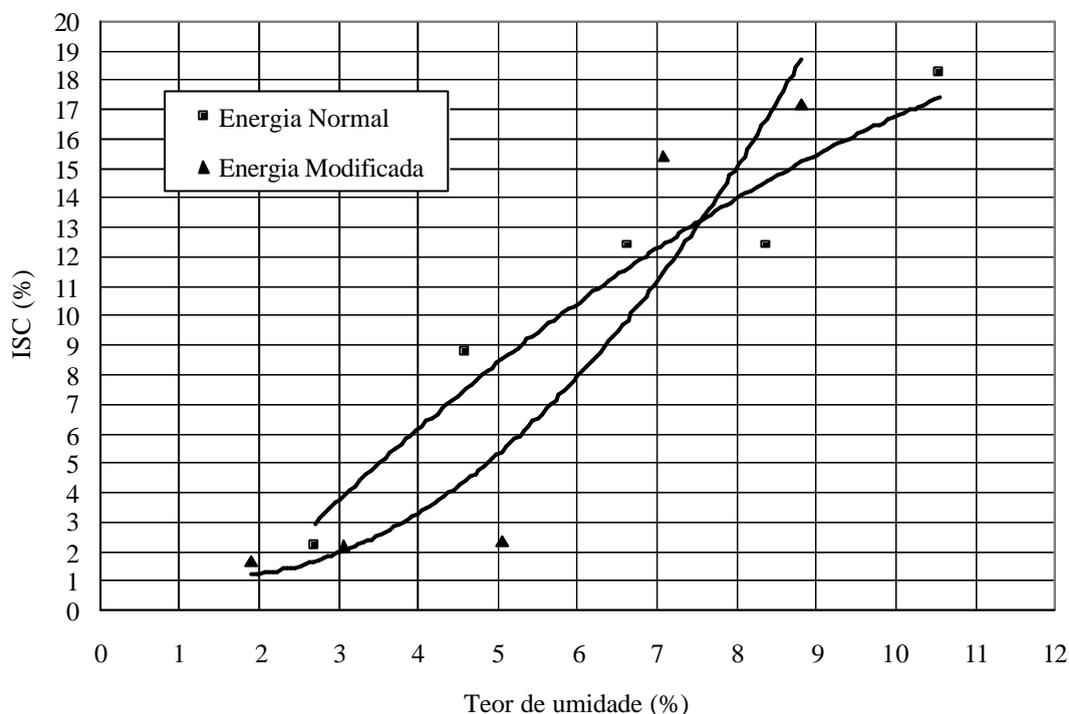


Figura 3. 15 - Curvas do ensaio de ISC do solo.

A resistência mecânica do solo foi avaliada mediante ensaios de compressão simples, objetivando sua comparação com as resistências de misturas solo-CCA-cal, e avaliar a eficiência da estabilização. Sendo o solo em estudo uma areia com um teor muito baixo de fração fina (6,5%), é de esperar que a resistência à tração seja desprezível, razão pela qual o solo não foi ensaiado à tração por compressão diametral.

A Figura 3.16 mostra o comportamento tensão-deformação no ensaio de resistência à compressão simples dos 3 corpos-de-prova do solo, compactados na energia Normal. Observa-se que comportamento tensão-deformação foi nos três casos o típico de solos arenosos, apresentando resistência de pico, além do qual as quedas de resistência não foram muito significativas. As diferenças observadas no comportamento tensão-deformação e nos valores de resistência máxima devem-se as diferenças nos pesos específicos secos e os teores de umidade de cada corpo-de-prova, como é mostrado na mesma figura.

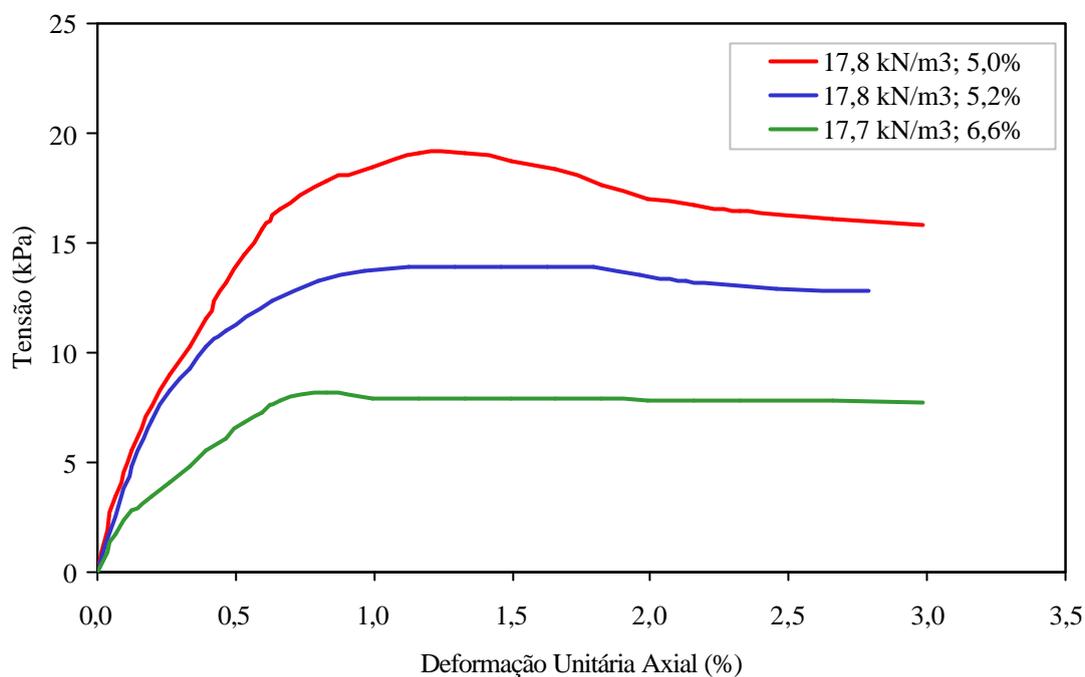


Figura 3. 16 - Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à compressão simples de três corpos-de-prova do solo.

O Quadro 3.2 mostra os valores de resistência à compressão simples (RCS) dos 3 corpos-de-prova do solo, resultantes do ensaio, medidas a partir da resistência de pico da curva tensão-deformação. Assim mesmo são incluídos os valores dos módulos de deformabilidade secantes ( $E_{0,75\sigma_{rup}}$ ) entre a origem e a tensão correspondente a 0,75 vezes a tensão de ruptura. Incluem-se os valores médios.

Quadro 3. 2 – Resistência à compressão simples e módulo secante do solo.

Corpo-de-prova		RCS (kPa)	$E_{0,75\sigma_{rup}}$ (MPa)
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega_{ót}$ (%)		
17,7	6,6	8,2	1,3
17,8	5,2	13,9	2,5
17,8	5,0	19,1	2,6
Valor Médio		13,7	2,1

Tal como foi de esperar para um solo arenoso com muito pouco teor de fração fina (passante na peneira No. 200), a RCS média dos três corpos-de-prova ensaiados é muito baixa, ocorrendo a ruptura de pico, como se observa na Figura 3.15, para pequenas deformações unitárias axiais da ordem de 1,0 – 1,5%. Portanto, o solo em estudo é de baixa capacidade suporte, baixa resistência e elevada deformabilidade.

### 3.2.3 Cal

Foi utilizada uma cal comercial, chamada de “Bulldog”, produzida pela Companhia Oriental de Minerales, na cidade de Pan de Azúcar, Departamento de Maldonado, leste de Uruguai. Uma das razões de sua seleção foi que a localidade de Pan de Azúcar fica próxima à bacia arrozeira da Lagoa Mirim.

Dos ensaios químicos determinou-se que a cal utilizada está constituída por 66,0% de óxido de cálcio (CaO) e 5,3% de óxido de magnésio (MgO). Outros elementos determinados qualitativamente foram sílica (SiO<sub>2</sub>) e óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Portanto, a cal utilizada na pesquisa é de tipo cálcica.

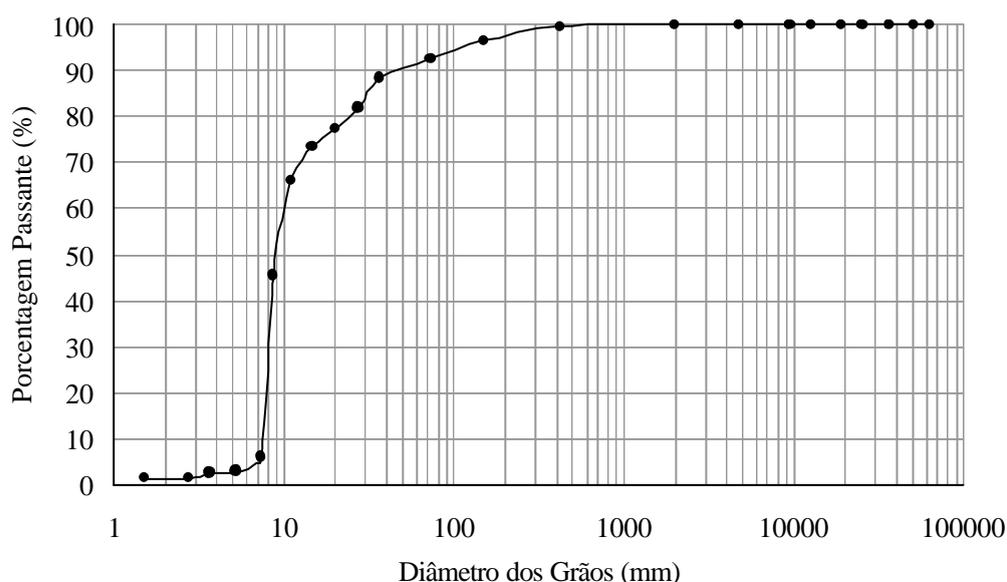


Figura 3. 17 – Distribuição granulométrica da cal.

A Figura 3.17 mostra a distribuição granulométrica da cal. Pode-se observar que a cal é fina, com 92,9% passando na peneira No. 200. O 100% da fração grossa passa na peneira No. 10, no entanto o 91,2% é de tamanho silte.

#### 3.2.4 Água

Utilizou-se água destilada para a produção das misturas solo-CCA-cal para os ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral. Os corpos-de-prova para os ensaios de compactação e de ISC foram moldados com água potável da rede pública de abastecimento. Água potável da rede pública também foi empregada para a imersão de 4 dias dos moldes do ensaio de ISC e nos ciclos de molhagem do ensaio de durabilidade.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X DAS MISTURAS SOLO-CCA-CAL

Com o objetivo de avaliar as reações que acontecem a longo prazo na estabilização de solos com cinza de casca de arroz residual (CCAr) e cal, difratogramas de raios-X foram realizados com o difratômetro de raios-X do Instituto de Física da Facultad de Ciencias, em amostras obtidas de corpos-de-prova com 28 dias de cura, imediatamente após serem ensaiados à compressão simples. Analisaram-se as misturas de solo-15%CCAr-5%Cal (Solo+15CCAr+5Cal), solo-20%CCAr-5%Cal (Solo+20CCAr+5Cal) e solo-20%CCAr-10%Cal (Solo+20CCAr+10Cal). As Figuras 4.1 a 4.3 mostram os difratogramas de raios-X das três misturas respectivamente, incluindo-se em todas elas os difratogramas de raios-X do solo e da CCAr.

Observa-se do difratograma de raios-X da Figura 4.1 que a mistura Solo+15CCAr+5Cal é composta fundamentalmente de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e cristobalita. A cristobalita é identificada pelos picos acentuados nos ângulos de difração ( $2\theta$ )  $21,9^\circ$  e  $36,2^\circ$  e corresponde à sílica cristalizada da CCAr que não reage com a cal. Por enquanto o quartzo é definido pelos picos acentuados para  $2\theta$  de  $26,6^\circ$ ,  $42,4^\circ$  e  $50,1^\circ$  e corresponderia à sílica do solo arenoso. Os picos de montmorilonita do solo, para  $2\theta$  de  $19,95^\circ$ ,  $35,05^\circ$  e  $54,28^\circ$ , desaparecem na mistura. A intensidade do pico de caolinita para  $2\theta$  de  $28,9^\circ$  é reduzida entre o solo e a mistura, sumindo na mistura o pico de  $14,2^\circ$ . Provavelmente parte da cal reagiu com os argilo-minerais do solo.

Destaca-se na Figura 4.1, para a mistura Solo+15CCAr+5Cal, um aumento das intensidades dos picos para  $2\theta$  de  $20,9^\circ$  e  $42,4^\circ$  e para  $36,35^\circ$ , definidos na análise como correspondente a quartzo, os dois primeiros, e a cristobalita o último. No difratograma é dificultoso detectar a formação de produtos pozolânicos. As dificuldades na interpretação dos difratogramas desta e das outras misturas solo-CCAr-cal, dever-se-iam aos deslocamentos sistemáticos nos ângulos de difração dos padrões resultantes do difratômetro de raios-x utilizado. Portanto, é de supor que os picos de maior intensidade observados, correspondam a algum tipo de produto cimentante muito difícil de ser

identificado devido a que seu padrão seria interferido pelos padrões do quartzo e da cristobalita. Por enquanto, não foi possível verificar tal hipótese.

O difratograma de raios-X da mistura Solo+20CCAr+5Cal após 28 dias de cura da Figura 4.2, mostra novos picos acentuados em  $2\theta$  de  $24,37^\circ$  e  $35,75^\circ$ , que revelam produção de antigorita, um silicato hidratado de magnésio ( $3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Os picos de quartzo do solo permanecem na mistura. No entanto, observam-se picos de maior intensidade em  $2\theta$  de  $26,75^\circ$ ,  $50,15^\circ$  e  $55,34^\circ$ , com respeito aos mesmos picos do solo, identificados na análise como de quartzo. Também permanecem, com intensidades variáveis, os picos de cristobalita correspondentes a  $2\theta$  de  $21,96^\circ$ ,  $31,42^\circ$  e  $36,35^\circ$ . Os picos correspondentes aos argilo-minerais do solo desaparecem na mistura após 28 dias de cura.

Como resultado da análise do difratograma da Figura 4.2, conclui-se que a mistura Solo+20CCAr+5Cal com 28 dias de cura apresenta uma mineralogia composta fundamentalmente de quartzo, cristobalita e pouca antigorita. Além disso, os picos de maior intensidade poderiam ser associados a produtos cimentantes de difícil identificação.

Não foram encontrados relatos sobre formação de silicatos hidratados de magnésio nas reações pozolânicas entre a cal e os argilo-minerais de solos finos ou entre a cal e as cinzas. Ali *et al.* (1992) observaram a formação de silicatos hidratados de cálcio ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  e CSH (1)) e de alumino-silicatos hidratados de cálcio ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ) em difratogramas de raios-X de misturas de um solo residual granítico da Malásia com CCA e cal com 7, 28 e 90 dias de cura. O referido solo estabilizado foi classificado segundo o SUCS como SC e sua distribuição granulométrica constituída por 1% de pedregulho, 52% de areia, 15% de silte, 32% de argila. A CCA utilizada foi produzida por incineração a céu aberto, sendo a cal do tipo cálcica.

Basha *et al.* (2005), estabilizando com CCA produzida por queima de casca de arroz em um incinerador e cimento Portland, um solo residual fino, com 46% de areia, 44% de silte e 10% de argila, observaram, mediante difratometria de raios-X de amostras com 7 dias de cura, a formação de analcita ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) e carbonato de cálcio. Segundo os autores, estes produtos indicam a ocorrência de reações pozolânicas

com produção de materiais cimentantes. Porém, tal qual a antigorita, a composição química da analcita não inclui cálcio.

Portanto, na mistura Solo+20CCAr+5Cal existem evidências de formação de produtos pozolânicos aos 28 dias de cura, mas em poucas quantidades. Parte da cal deve ter reagido com os argilo-minerais do solo, o que explicaria o desaparecimento da montmorilonita e da caolinita no difratograma de raios-X da mistura.

São observados no difratograma de raios-X da mistura Solo+20CCAr+10Cal com 28 dias de cura, na Figura 4.3, novos picos para  $2\theta$  de  $18,37^\circ$ ,  $34,21^\circ$ ,  $47,45^\circ$  e  $51,15^\circ$ , identificados como um hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) chamado de portlandita. Levando o deslocamento sistemático do difratômetro utilizado, estes novos picos poderiam associar-se a produtos cimentantes em formação. Mais dois novos picos são observados para  $2\theta$  de  $37,5^\circ$  e  $45,21^\circ$ . O primeiro deles foi reconhecido como CaO, o que indica excesso de cal sem reagir após 28 dias de cura, existindo a possibilidade de desenvolvimentos posteriores de reações pozolânicas, na medida em que houver sílica amorfa suficiente na cinza da mistura. O novo pico ocorrente nos  $45,21^\circ$  é típico de illita, que poderia ser parte componente do solo original. Os picos correspondentes à montmorilonita desaparecem na mistura, no entanto os picos de caolinita se apresentam com menor intensidade.

Na amostra Solo+20CCAr+10Cal os produtos pozolânicos estariam ainda em processo de formação aos 28 dias de cura, sendo a razão das dificuldades de sua identificação no difratograma.

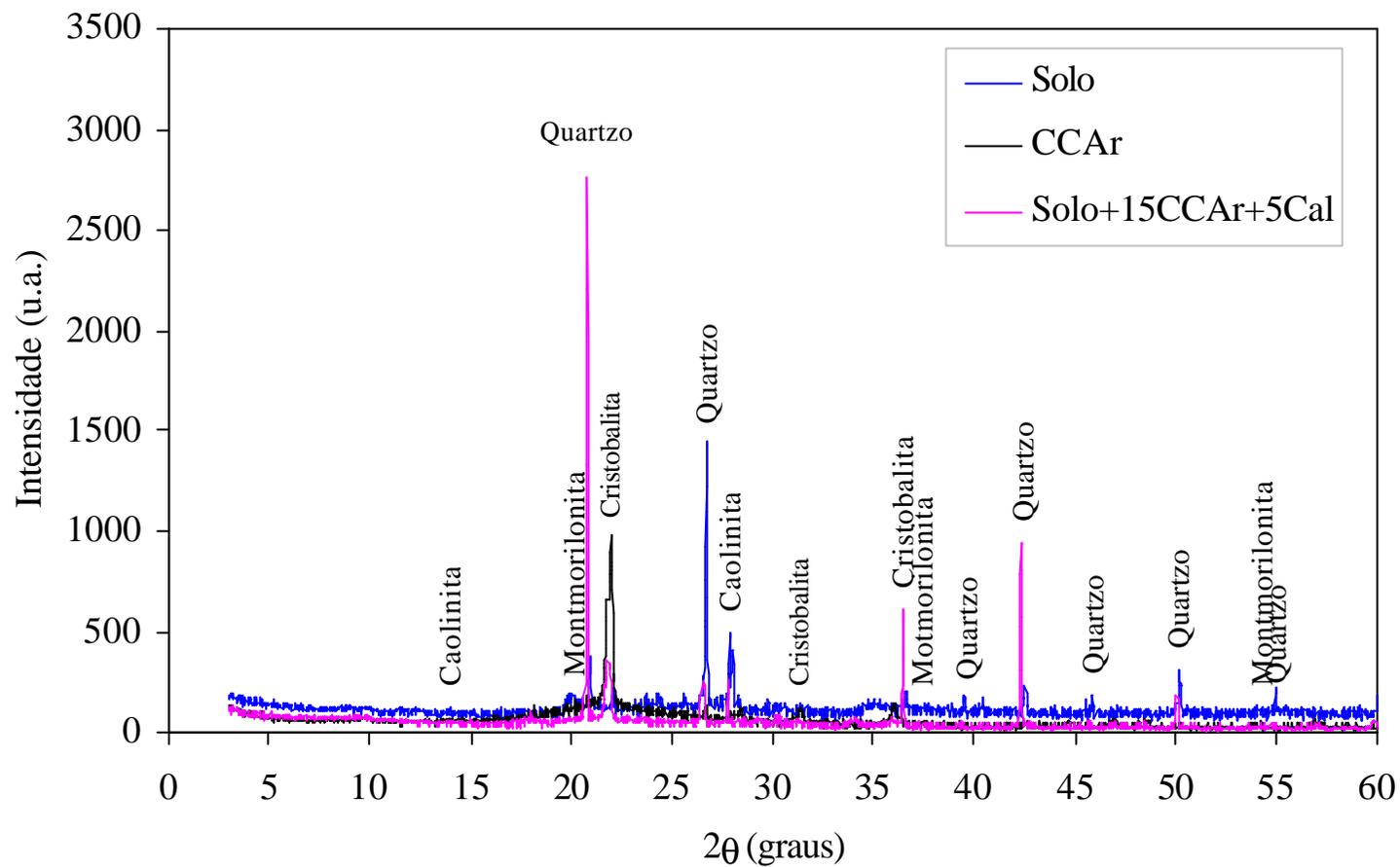


Figura 4. 1 - Difratoograma de raios-X da amostra da mistura solo-15%CCAr-5%Cal curada 28 dias, do solo e da cinza de casca de arroz residual.

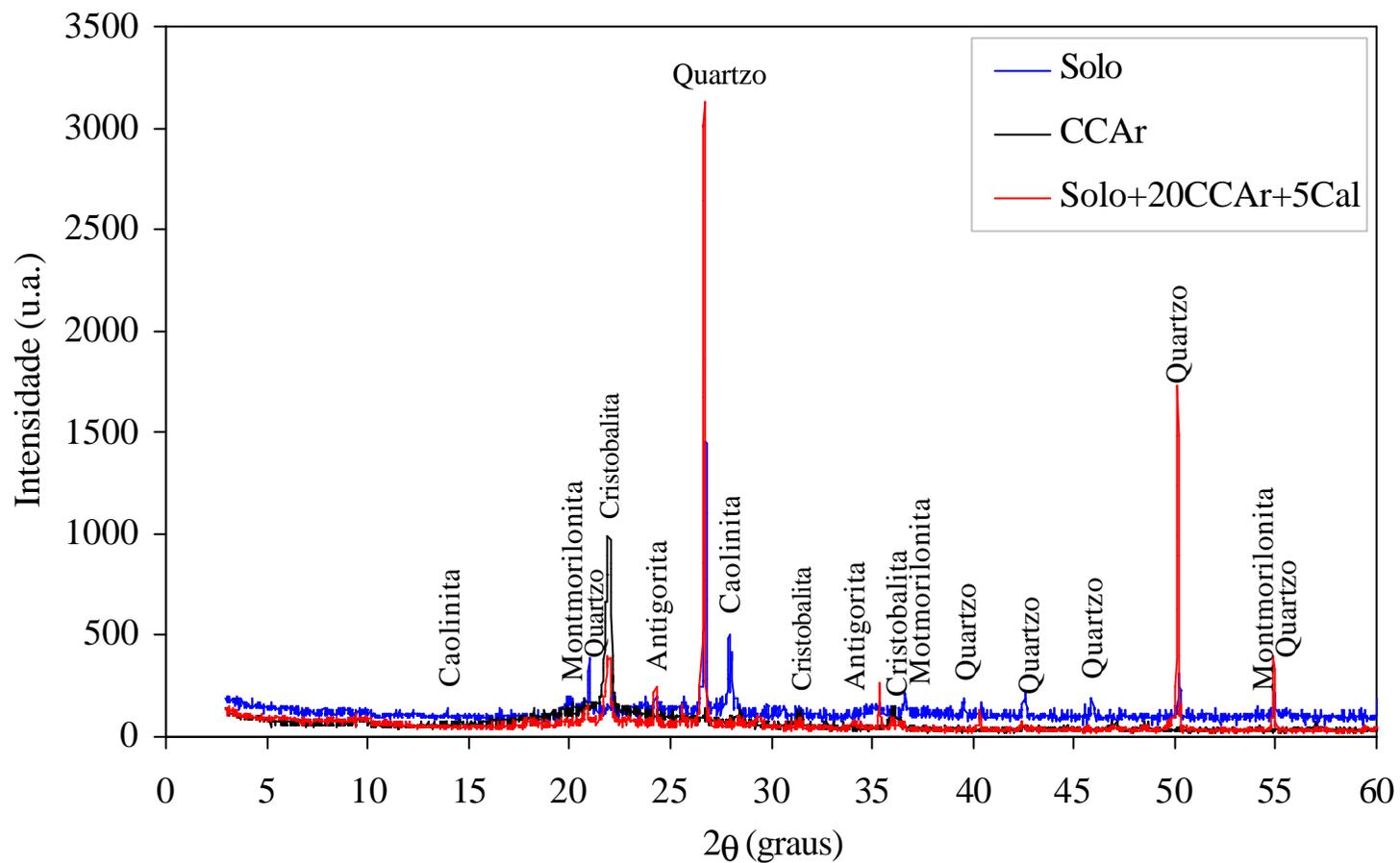


Figura 4. 2 - Difratograma de raios-X da amostra da mistura solo-20%CCAr-5%Cal curada 28 dias, do solo e da cinza de casca de arroz residual.

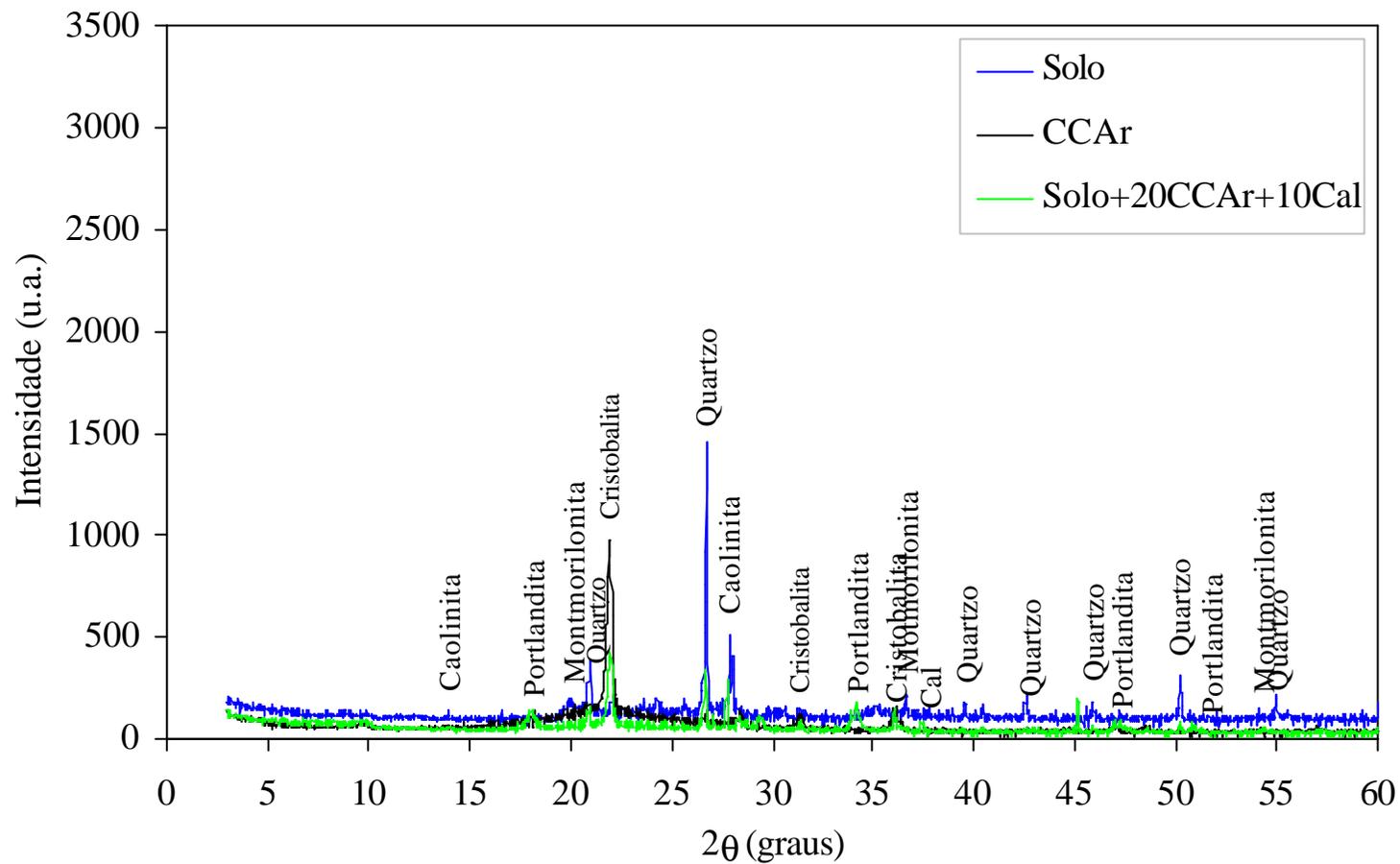


Figura 4. 3 - Difratoograma de raios-X da amostra da mistura solo-20%CCAr-10%Cal curada 28 dias, do solo e da cinza de casca de arroz residual.

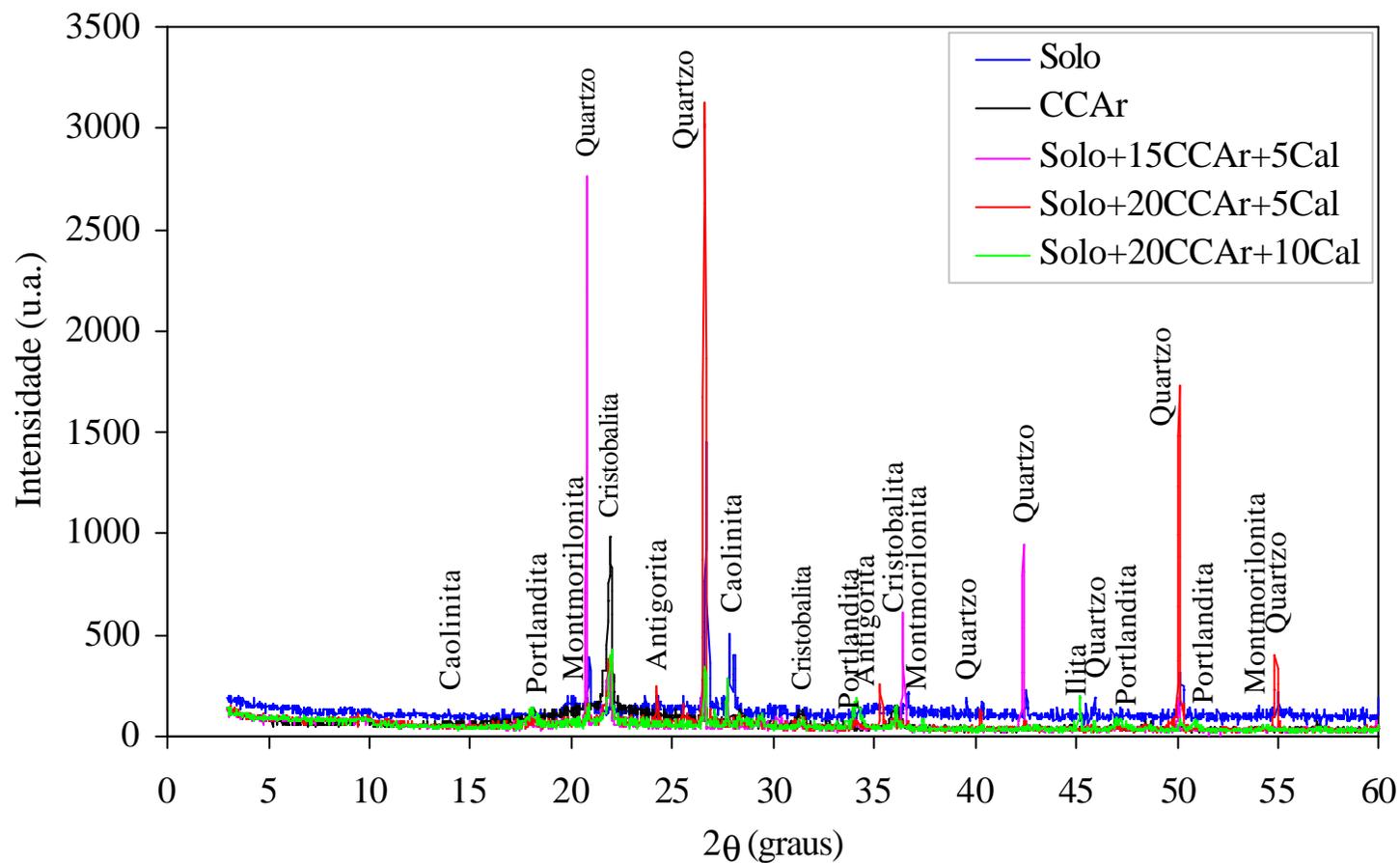


Figura 4. 4 - Difratoformas de raios-X das misturas de solo-CCAr-Cal com 28 dias de cura, do solo e da cinza de casca de arroz residual.

A Figura 4.4 apresenta os difratogramas de raios-X para todas as misturas solo-CCAr-Cal com 28 dias de cura, incluindo também os correspondentes ao solo e a CCAr. A presença de antigorita na mistura Solo+20CCAr+5Cal, comprovaria que ocorreram reações pozolânicas nas misturas com formação de produtos cimentantes. As dificuldades na sua identificação nos difratogramas de raios-X após 28 dias de cura das misturas, indicaria a pouca quantidade dos produtos cimentantes formados, devido à baixa atividade pozolânica da CCAr. Além disso, estes produtos estariam ainda em processo de cristalização. As reações pozolânicas acontecem entre a cal e a cinza amorfa, o que fica demonstrado na permanência do quartzo do solo e da cristobalita da cinza nos difratogramas das misturas. Poucas reações têm lugar entre a cal e os argilo-minerais do solo.

#### 4.2 CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO

A Figura 4.5 mostra as curvas de compactação da mistura solo-20%CCAr-10%cal na energia Normal e do solo a energia Normal e Modificada. A curva de compactação da mistura Solo+20CCAr+10Cal é achatada, sem pico definido, sendo muito similar à do solo natural. A trabalhabilidade do solo natural não é melhorada pela adição de CCA e cal.

Como não houve demora entre a mistura e a compactação, a adição da CCAr e da cal não produz modificações de importância na textura do solo arenoso. As reações entre a cinza de casca de arroz e a cal são lentas (dependentes do tempo). Por sua vez, sendo muito baixo o teor da fração argilosa no solo, os efeitos das possíveis reações rápidas entre os argilo-minerais do solo e a cal são praticamente desprezíveis.

O comportamento peso específico seco em função do teor de umidade da mistura Solo+20CCAr+10Cal, dificultou a definição dos parâmetros ótimos de compactação. Os pesos específicos secos máximos ( $\gamma_{dmáx}$ ) e os teores de umidade ótimos ( $\omega_{ót}$ ) encontrados para a mistura solo-CCA-cal e o solo natural compactado nas energias Normal e Modificada são mostrados na Tabela 4.1.

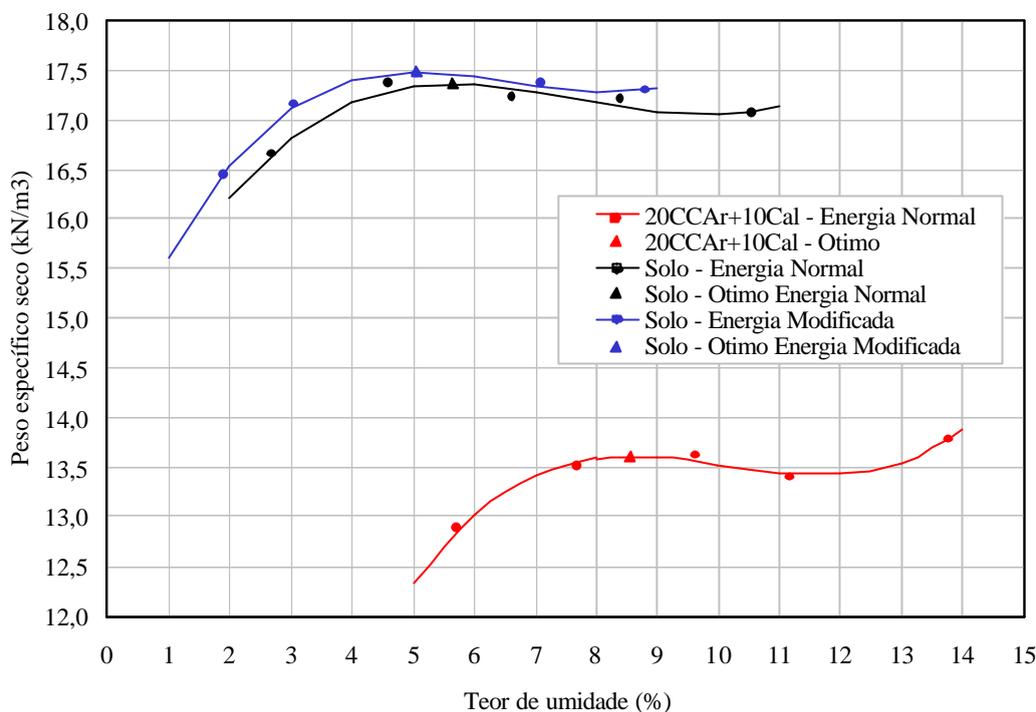


Figura 4. 5 - Curvas de compactação da mistura solo-20%CCAr-10%Cal à energia normal e do solo às energias normal e modificada.

Tabela 4. 1 – Parâmetros ótimos de compactação da mistura solo-CCAr-cal.

Material	Peso Específico Seco Máximo (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de Umidade Ótima (%)
Solo-20%CCA-10%Cal	13,6	8,5
Solo – Energia Normal	17,4	5,5
Solo – Energia Modificada	17,5	5,0

A adição de 20% de CCAr e 10% de cal causa uma forte diminuição no peso específico seco máximo e um aumento do teor ótimo de umidade, em comparação com o solo natural para as duas energias de compactação. Os resultados coincidem com os encontrados por Ali *et al.* (1992) e Muntohar e Hantoro (2000). A forte queda do peso específico seco máximo na mistura é devida à soma das baixas densidades reais dos

grãos (G) da CCAr e da cal (Ali *et al.*, 1992), sendo que não houve tempo suficiente para desenvolver-se as reações pozolânicas.

Parte da água, acrescentada à mistura é absorvida pela CCA, devido a suas características porosas (Zhang *et al.*, 1996). Outra parte da água é consumida pela cal na hidratação. Como resultado será necessário adicionar mais água para reduzir os efeitos da sucção nos vazios, de forma de conseguir a maior eficiência na compactação.

#### 4.3 CAPACIDADE DE SUPORTE

Thompson (1975) salientou que, embora seja usado de forma extensiva, o Índice Suporte de Califórnia (ISC) não é apropriado para caracterizar a resistência de solos estabilizados com cal. A afirmação pode ser estendida para o caso da estabilização de solos com CCA e cal. Os valores de ISC para misturas curadas podem ser superiores a 100%. Nesses casos é notório que o resultado do ensaio é de escasso significado prático. Se as reações pozolânicas não tiveram ocorrido, como no caso de amostras não curadas, o ISC pode servir como indicativo geral de resistência.

Na Figura 4.6 são mostrados os comportamentos do ISC do solo compactado nas energias Normal e Modificada e da mistura solo-20%CCAr-10%Cal (Solo+20CCAr+10Cal) na energia Normal e com 28 dias de cura, em função do teor de umidade de compactação dos corpos-de-prova dos ensaios Proctor.

Observa-se uma tendência ao aumento do ISC da mistura Solo+20CCAr+10Cal com o aumento do teor de umidade de compactação, inclusive para os teores de umidade além do ótimo do ensaio de compactação (8,5%). O mesmo aumento de ISC além do teor de umidade ótimo é verificado para o solo para as duas energias de compactação. Porém, a razão de incremento do ISC diminui no solo compactado à energia normal à medida que o teor de umidade aumenta. Observa-se um aumento íngreme do ISC para os teores de umidade além do ótimo para o mesmo solo compactado à energia modificada.

A tendência da curva ISC em função do teor de umidade da mistura Solo+20CCAr+10Cal compactada na energia normal e curada 28 dias é mais semelhante à do solo compactado na energia normal, porém com menor curvatura.

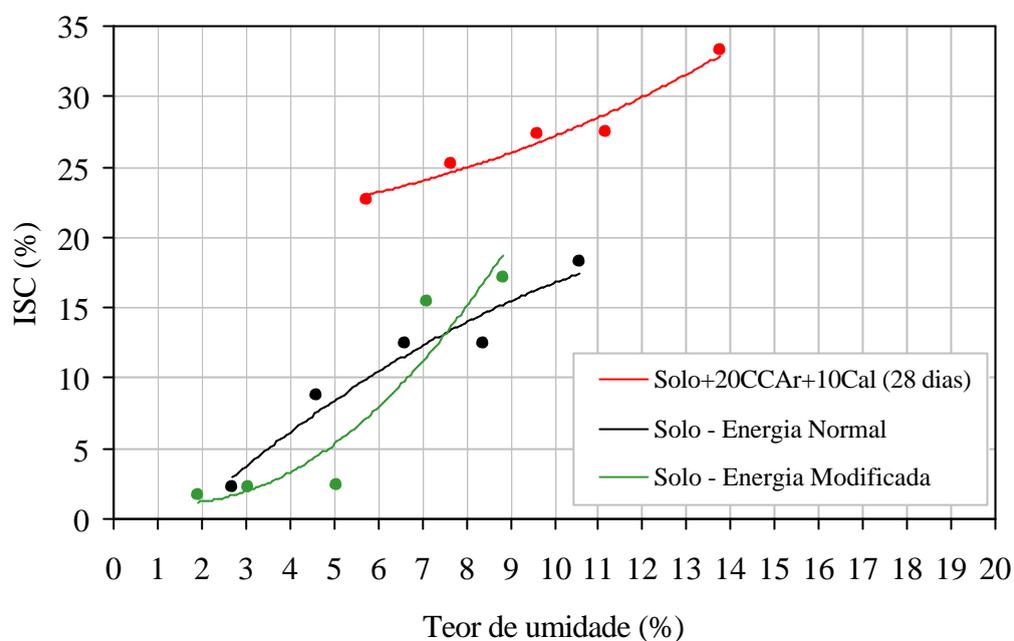


Figura 4. 6 – Curvas de ISC da mistura solo-20%CCAr-10%Cal e do solo.

Os valores de ISC obtidos para a mistura Solo+20CCAr+10Cal são maiores que os correspondentes ao solo, tanto compactado na energia Normal quanto Modificada, para todos os teores de umidade. A Tabela 4.2 mostra os valores de ISC correspondentes aos pesos específicos secos máximos e os teores de umidade ótimos de compactação do solo nas energias Normal e Modificada e da mistura Solo+20CCAr+10Cal na energia Normal e curada 28 dias.

Tabela 4. 2 – ISC correspondentes aos parâmetros ótimos de compactação da mistura solo-20%CCAr-10%Cal e o solo.

MATERIAL	ISC (%)
Solo – Energia Normal	9
Solo – Energia Modificada	5
Solo-20%CCAr-10%Cal	25

O ISC do solo estabilizado com 20% de CCAr e 10% de cal é 2,8 e 5 vezes maior que os ISC obtidos para o solo natural compactado nas energias Normal e Modificada respectivamente. Na média o incremento do ISC, devido à estabilização do solo, é de 3,9 vezes, embora a CCAr utilizada seja de baixa atividade pozolânica devido à presença de sílica cristalina e de carvão.

Resultados similares foram determinados por Muntohar e Hantoro (2000), estabilizando com CCA e cal um solo argiloso. O solo natural apresentou um ISC de 3%, passando para um valor máximo de 17% para uma mistura solo-12,5%CCA-6%Cal, ou seja, um aumento de 5,7 vezes.

Assim, conclui-se que o incremento do ISC do solo arenoso desta pesquisa é significativo, indicando que ocorreram reações pozolânicas entre a sílica amorfa da CCAr e a cal que produzem melhoria na capacidade suporte do solo estabilizado. O efeito de filler da cinza e da cal acrescentados ao solo, atuando como finos, produzem uma correção granulométrica, sendo mais outra causa possível do aumento do ISC. Em função do valor de ISC obtido para a mistura solo-20%CCAr-10%Cal, pode-se afirmar que esse material poderia ser empregado até para camadas de sub-base de pavimentos.

#### 4.4 COMPORTAMENTO TENSÃO – DEFORMAÇÃO

A análise do comportamento tensão-deformação das misturas de solo com CCA residual da queima da casca de arroz num forno sem controle de temperatura e com cal foi desenvolvido a partir dos ensaios de resistência à compressão simples. Foi observada a influência do tempo de cura, dos teores de CCA residual e cal e do tempo de espera entre mistura e compactação.

##### 4.4.1 Influência do tempo de cura

Nas Figuras 4.7 a 4.9 são apresentadas as curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à compressão simples das misturas solo, 15% de CCAr e 5% de cal; solo,

20% de CCAr e 5% de cal e solo, 20% de CCAr e 10% de cal respectivamente, para tempos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias. Para cada mistura e tempo de cura foram ensaiados 3 corpos-de-prova, porém, por simplicidade nas figuras é representada uma das curva tensão-deformação de cada condição, adotando-se como representativa aquela curva tensão-deformação cuja resistência última de pico foi a mais próxima à resistência média para cada mistura.

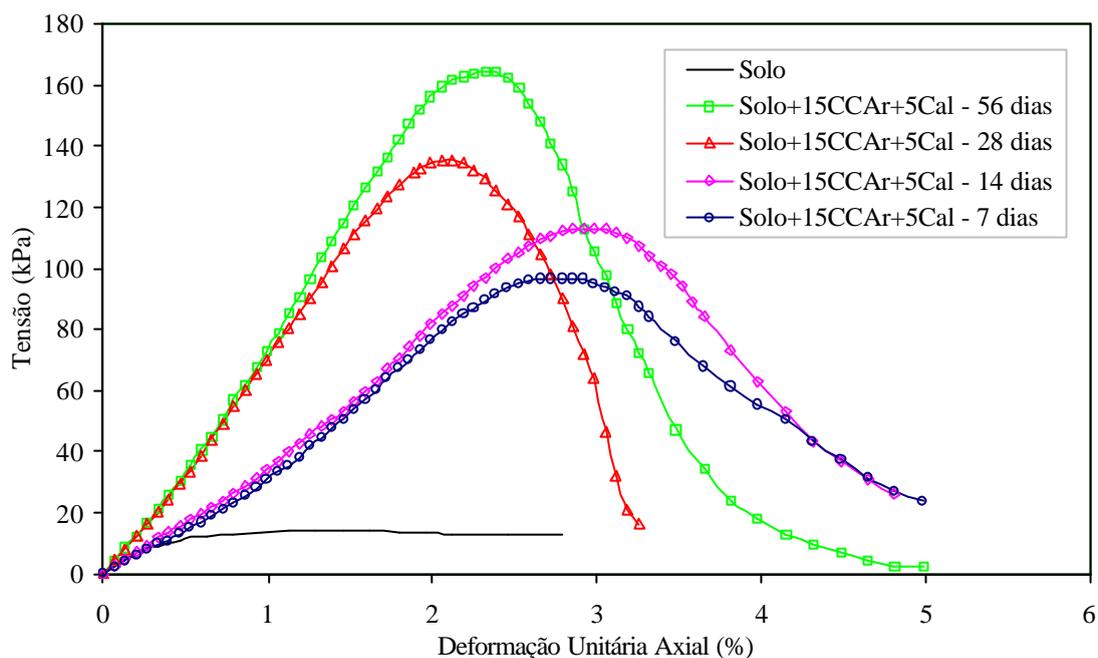


Figura 4. 7 - Curva tensão-deformação das misturas solo-15%CCAr-5%Cal para diferentes tempos de cura.

Os resultados mostram que todas as misturas solo-CCAr-cal para todos os tempos de cura, apresentam uma ruptura mais frágil que o solo, com quedas abruptas após da tensão de ruptura de pico. A fragilidade das misturas é tanto maior quanto maior for o tempo de cura, o que indica que houve geração dos produtos cimentantes com o tempo.

Também todas as misturas tornaram-se mais rígidas que o solo, mesmo com apenas 7 dias de cura. Tanto as tensões de ruptura quanto os módulos de deformabilidade foram muito superiores aos valores correspondentes ao solo natural.

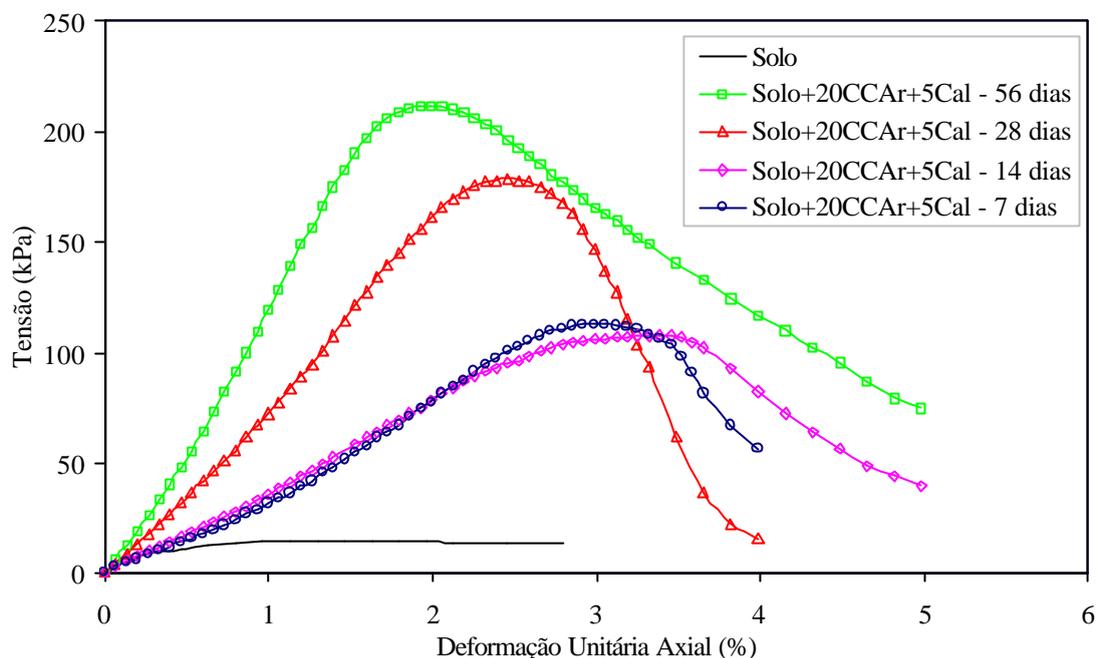


Figura 4. 8 - Curvas tensão-deformação das misturas solo-20%CCAr-5%Cal para diferentes tempos de cura.

Os resultados observados coincidem com os obtidos por Muntohar e Hantoro (2000) ao estabilizarem com CCA e cal um solo argiloso. Porém, para os materiais estudados nesta dissertação, a deformação unitária axial ( $\epsilon_r$ ) na ruptura foi menor no solo natural do que nas misturas solo-CCA-Cal para todos os teores e tempos de cura.

O comportamento tensão-deformação das misturas de solo com CCA e com cal foi avaliado medindo os módulos de deformabilidade secante entre a origem e a tensão correspondente a 0,75 vezes a tensão de ruptura ( $E_{0,75\sigma_{rup}}$ ). Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  médios obtidos para todos os teores de CCAr e cal e tempos de cura.

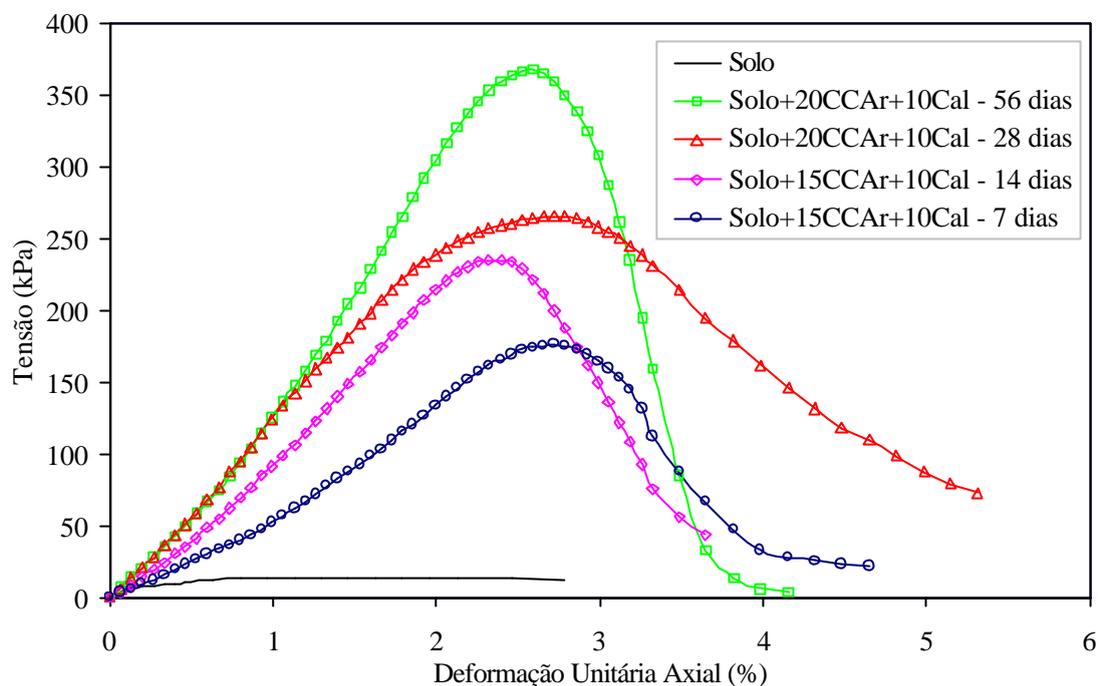


Figura 4. 9 - Curvas tensão-deformação das misturas solo-20%CCAr-10%Cal para diferentes tempos de cura.

Tabela 4. 3 – Módulo secante médio para as diferentes misturas solo-CCAr-cal e tempos de cura.

TEMPO DE CURA (dias)	$E_{0,75\sigma_{rup}}$ (MPa)		
	15CCAr+5Cal	20CCAr+5Cal	20CCAr+10Cal
7	3,9	3,7	7,4
14	4,6	4,6	9,5
28	5,5	5,6	12,4
56	6,1	6,8	13,3

A Figura 4.10 mostra a variação dos módulos secantes ( $E_{0,75\sigma_{rup}}$ ) com o tempo de cura para as três misturas solo-CCAr-cal. Na origem é colocado o valor médio do módulo secante do solo sem tratar, que foi de 2,1 MPa. Observa-se uma relação linear entre o  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  e a potência do tempo de cura para as três misturas solo-CCAr-cal, obtendo-se os seguintes modelos:

$$\text{Para } 15\% \text{CCAr} + 5\% \text{Cal: } E_{0,75\sigma_{rup}} = 3,5 \cdot t^{0,12}; R^2 = 0,96 \quad (4.1)$$

$$\text{Para } 20\% \text{CCAr} + 5\% \text{Cal: } E_{0,75\sigma_{rup}} = 3,55 \cdot t^{0,12}; R^2 = 0,91 \quad (4.2)$$

$$\text{Para } 20\% \text{CCAr} + 10\% \text{Cal: } E_{0,75\sigma_{rup}} = 5,5 \cdot t^{0,21}; R^2 = 0,99 \quad (4.3)$$

Nesses modelos  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  é módulo secante entre a origem e  $0,75\sigma_{rup}$  (em MPa) e  $t$  o tempo de cura em dias.

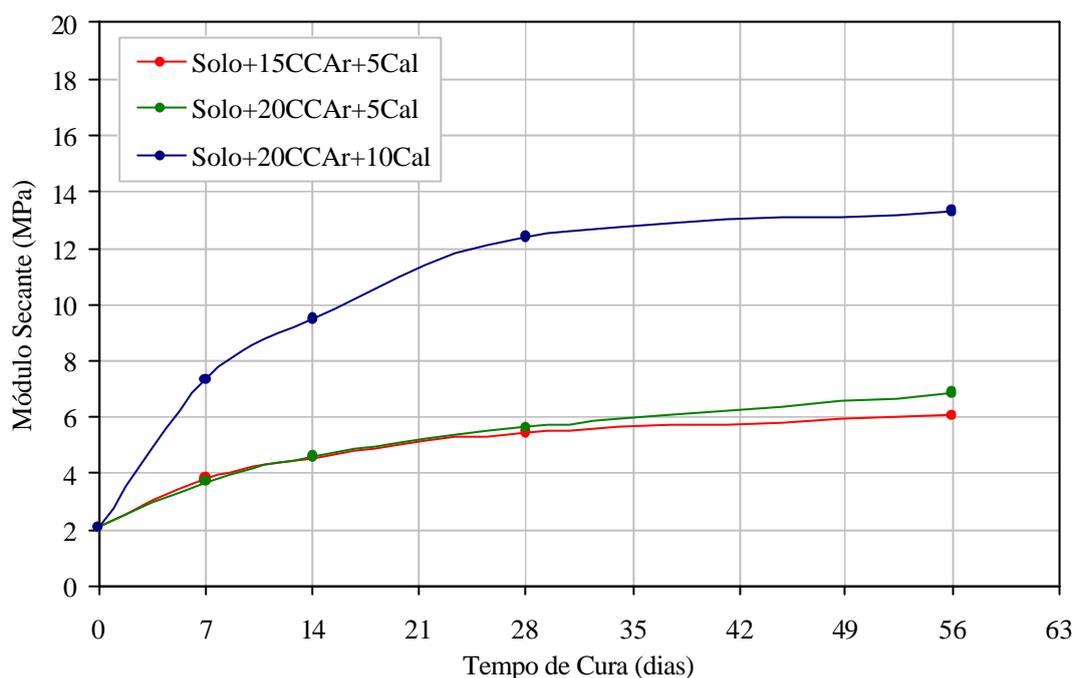


Figura 4. 10 – Evolução do Módulo secante com o tempo de cura das misturas solo-CCAr-cal.

As misturas com 15% de CCAr e 5% de cal e 20% de CCAr e 5% de cal apresentam uma evolução dos valores de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  com os tempos de cura praticamente iguais, até os 28 dias de cura. Já para os 56 dias de cura o módulo de deformabilidade da mistura Solo+20CCAr+5Cal é algo maior, observando-se uma tendência de aumento após esse tempo de cura. A mistura com 15% de CCAr e 5% de cal apresentou aos 7 dias uma rigidez equivalente a 63,5% da rigidez correspondente aos 56 dias, e aos 28 dias foi de 90% do valor correspondente aos 56 dias. Aos 56 dias de cura o valor de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  dessa mistura foi 3 vezes maior que o correspondente ao solo natural.

Para a mistura com 20% de CCAr e 5% de cal o módulo aos 7 dias equivale a 54,5% do correspondente aos 56 dias, e aos 28 dias foi de 82,5%. O valor de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  para 56 dias de cura foi 3 vezes maior que o do solo natural. Portanto, as misturas com 15% de CCAr e 5% de cal e com 20% de CCAr e 5% de cal apresentam um ganho de rigidez relativamente rápido, com valor máximo de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  aos 28 dias de cura para a mistura Solo+15CCAr+5Cal e aos 56 dias de cura para a mistura Solo+20CCAr+5Cal.

Mais significativos são os aumentos de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  com o tempo de cura para a mistura com 20% de CCAr e 10% de cal. Assim, para 56 dias de cura o  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  para esta mistura foi 6 vezes superior ao  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  do solo. Contudo, observa-se um ganho rápido de rigidez, já que o valor de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  aos 7 dias de cura é o 55,5% da rigidez correspondente aos 56 dias, e aos 28 dias foi de 93%. A taxa de aumento de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  após 28 dias de cura é menor, indicando que a maior parte das reações entre a sílica da CCAr e a cal ocorrem antes de esse tempo de cura. Entre os 28 e os 56 dias de cura as reações seguem ocorrendo em menor medida, devido à existência de cal disponível na mistura sem reagir.

#### 4.4.2 Influência dos teores de CCAr e cal

Os efeitos dos teores de CCAr e cal no comportamento tensão-deformação das misturas solo-CCAr-cal para os quatro tempos de cura considerados nesta pesquisa são mostrados na Figura 4.11. Na origem é colocado o valor médio do módulo secante do solo, que foi de 2,1 MPa.

Observa-se que para o teor de CCAr de 20%, a evolução dos módulos de deformabilidade secantes com os teores de cal segue uma tendência parabólica de segundo grau para todos os tempos de cura. Já as curvas correspondentes a 15% de CCAr são lineares com os teores de cal; observa-se, contudo, que se dispunha apenas de dois pontos, sendo, assim, o ajuste linear óbvio.

O aumento dos  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  para todas as misturas, demonstraria a existência de reações pozolânicas entre a CCAr e a cal independentemente dos teores utilizados na

pesquisa. Thompson (1965) observou similares aumentos de rigidez devidos à cimentação de solos estabilizados com cal.

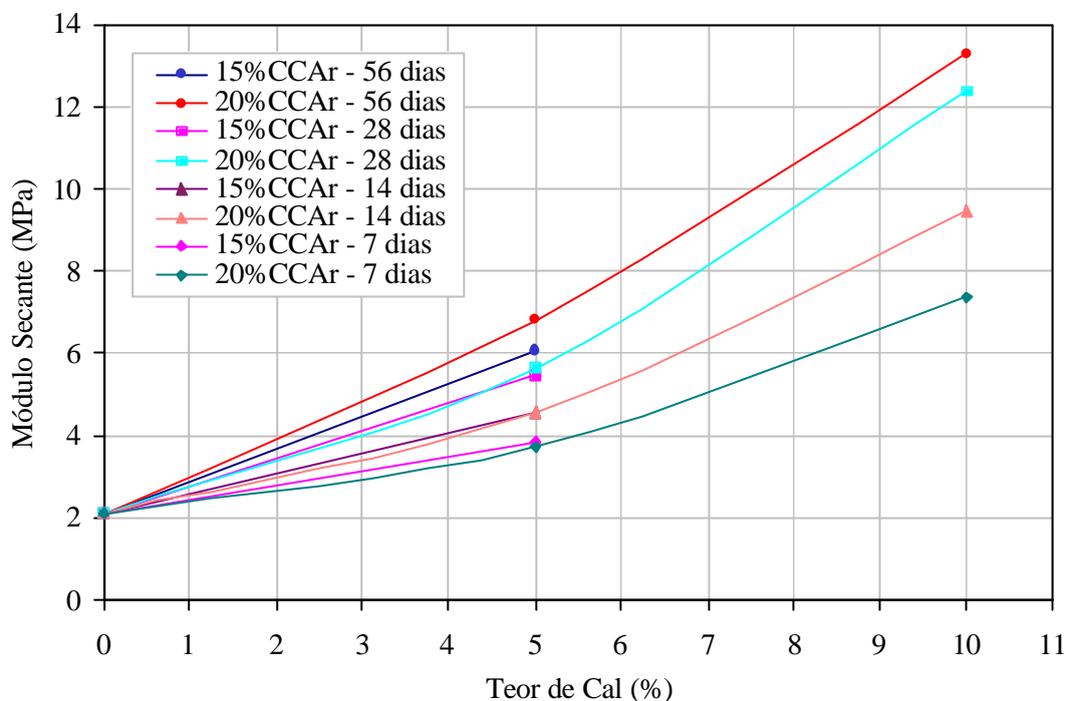


Figura 4. 11 - Evolução do Módulo secante com os teores de CCAr e cal das misturas para 7, 14, 28 e 56 dias de cura.

A evolução dos módulos secantes ( $E_{0,75\sigma_{rup}}$ ) em função do teor de cal (%cal) para um teor constante de CCAr de 20%, pode ser expresso mediante os seguintes modelos para 7, 14, 28 e 56 dias de cura, respectivamente.

$$E_{0,75\sigma_{rup}} \text{ (MPa)} = 0,04 \cdot (\%cal)^2 + 0,12 \cdot (\%cal) + 2,1; R^2 = 1,00 \quad (4.4)$$

$$E_{0,75\sigma_{rup}} \text{ (MPa)} = 0,05 \cdot (\%cal)^2 + 0,26 \cdot (\%cal) + 2,1; R^2 = 1,00 \quad (4.5)$$

$$E_{0,75\sigma_{rup}} \text{ (MPa)} = 0,06 \cdot (\%cal)^2 + 0,39 \cdot (\%cal) + 2,1; R^2 = 1,00 \quad (4.6)$$

$$E_{0,75\sigma_{rup}} \text{ (MPa)} = 0,03 \cdot (\%cal)^2 + 0,78 \cdot (\%cal) + 2,1; R^2 = 1,00 \quad (4.7)$$

Não existe uma modificação notável nos valores de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  quando o teor de CCAr passa de 15% para 20%, o que se constata observando que as curvas de ajuste

para 15% e 20% de CCAr são coincidentes no intervalo de teores de cal de 0 e 5%. Portanto, não haveria influência da mudança do teor de CCAr de 15% para 20% na rigidez das misturas quando se adiciona 5% de cal ao solo.

A mudança do teor de cal de 5% para 10% nas misturas com 20% de CCAr produz um aumento nos valores de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  com taxa maior que quando se adiciona apenas 5% de cal. Isto se traduz em um aumento das declividades das curvas de ajuste. Assim, as misturas de solo, 20% de CCAr e 10% de cal propiciariam os maiores módulos para o solo estabilizado. Uma possível explicação para o observado é que quando se acrescenta uma elevada quantidade de CCAr (20%), o aumento do teor de cal, de 5 para 10%, ocasionaria o prolongamento das reações pozolânicas, melhorando o comportamento tensão-deformação do solo.

#### 4.4.3 Influência do tempo de espera entre mistura e compactação

A Tabela 4.4 apresenta os valores de módulo secante médios entre a origem e  $0,75\sigma_{rup}$  no ensaio de resistência à compressão simples de corpos-de-prova da mistura solo, 20% de CCAr e 10% de cal, compactadas com demoras de 1, 2, 3 e 4 horas e imediatamente após da mistura. Todos os corpos-de-prova foram compactados a energia normal e curados por 28 dias.

Tabela 4. 4 – Efeito da demora na compactação no  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  da mistura solo-20%CCAr-10%Cal com 28 dias de cura.

Demora na Compactação (h)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E_{0,75\sigma_{rup}}$ (MPa)
0	13,9	12,4
1	14,1	14,3
2	13,8	11,1
3	13,7	7,7
4	13,8	6,7

A Figura 4.12 mostra graficamente essa variação de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  para a mistura solo, 20% de CCAr e 10% de cal. Observa-se que após um ligeiro aumento do módulo, quando a demora de compactação foi de 1 hora, os valores de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  diminuem, à medida que aumenta o tempo entre a compactação e a mistura. Quando o tempo de espera passou de 0 para 1 h, o ganho de rigidez foi de um 15%. Para 2 h de espera o valor de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  foi 90% do valor de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  para a compactação sem espera, caindo para 62% e 54% quando o tempo de espera aumentou para 3 e 4 horas respectivamente.

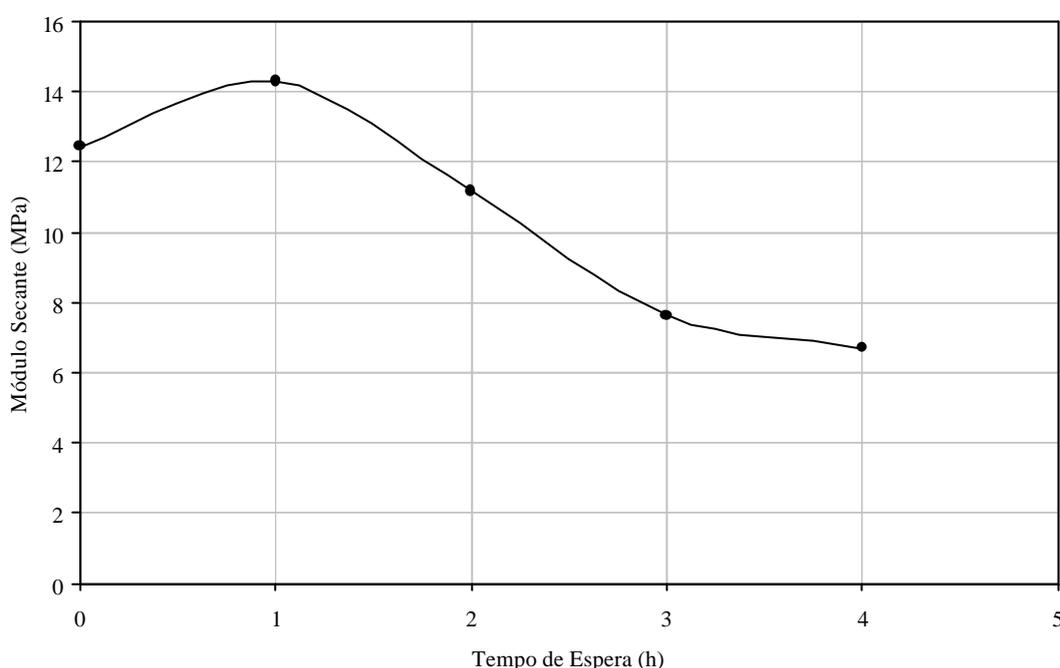


Figura 4. 12 – Evolução do módulo secante da mistura solo-20%CCAr-10%cal com 28 dias de cura em função do tempo de espera entre a mistura e a compactação.

De acordo com os resultados mostrados na Figura 4.12, aparentemente o período de uma hora propiciou a melhoria na trabalhabilidade da mistura. Para tempos maiores, com  $\gamma_d$  similares (segundo Tabela 4.4), a floculação-aglomeração deve ter provocado redução do índice de vazios e, sendo o teor de umidade o mesmo para todas as amostras, diminuição da sucção, o que explicaria a queda do módulo.

Lovato (2004), ao estabilizar um solo argiloso laterítico com cal, encontrou um resultado semelhante ao analisar o efeito da demora na compactação na RCS de misturas solo-cal.

Também deve considerar-se a heterogeneidade da CCAr utilizada, somada às heterogeneidades do solo e da cal, que poderiam ser as causas das diferenças nos valores dos módulos secantes.

Observa-se que a tendência após 4 h de espera é a estabilização do módulo num valor entre 6 e 7 MPa. No campo, tempos de espera de algumas horas são comuns, portanto, para efeitos de dimensionamento, seria adequado um módulo dessa magnitude.

#### 4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 4.13 mostra a forma dos corpos-de-prova das misturas solo-CCAr-cal compactadas para ensaios de resistência à compressão simples, observa-se a presença de impurezas tais como casca de arroz sem incinerar, tendo em geral estruturas com muitos vazios. Além disso, independentemente do tempo de cura, houve desagregações de material na face externa, devido às baixas cimentações produzidas.



Figura 4. 13 – Corpo-de-prova de mistura solo-CCAr-cal para o ensaio de resistência à compressão simples.

A seguir, analisa-se, para cada mistura com CCAr, a influência do tempo de cura, dos teores CCAr-cal e do tempo de espera entre mistura e compactação na RCS.

#### 4.5.1 Influência do tempo de cura

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores médios de resistência à compressão simples (RCS) das misturas solo-CCAr-cal curadas por tempos de 7, 14, 28 e 56 dias.

Tabela 4. 5 – Resistência à compressão simples (RCS) média para as diferentes misturas solo-CCAr-cal e tempos de cura.

TEMPO DE CURA (dias)	RCS (kPa)		
	15CCAr+5Cal	20CCAr+5Cal	20CCAr+10Cal
7	90,3	95,3	150,5
14	100,9	128,2	209,6
28	117,7	181,0	247,2
56	132,9	196,8	276,4

A evolução da RCS com o tempo de cura para as três misturas solo-CCAr-cal é mostrada na Figura 4.14. Na origem é colocado o valor médio da resistência à compressão simples do solo sem aditivo, que foi de 13,7 kPa.

Observa-se para as três misturas ensaiadas o constante aumento de RCS com o tempo de cura. A taxa de ganho de RCS é relativamente alta para os tempos de cura mais baixos.

Aos 7 dias de cura a RCS das misturas com 15% de CCAr e 5% de cal, 20% de CCAr e 5% de cal e 20% de CCAr e 10% de cal alcançaram, respectivamente, 68%, 48% e 54,5% das máximas RCS verificadas aos 56 dias de cura.

Aos 14 dias as razões entre a RCS e a máxima RCS correspondentes a 56 dias de cura foram respectivamente de 76%, 65% e 76%. As taxas de ganho de resistência diminuem com tempos de cura adicionais.

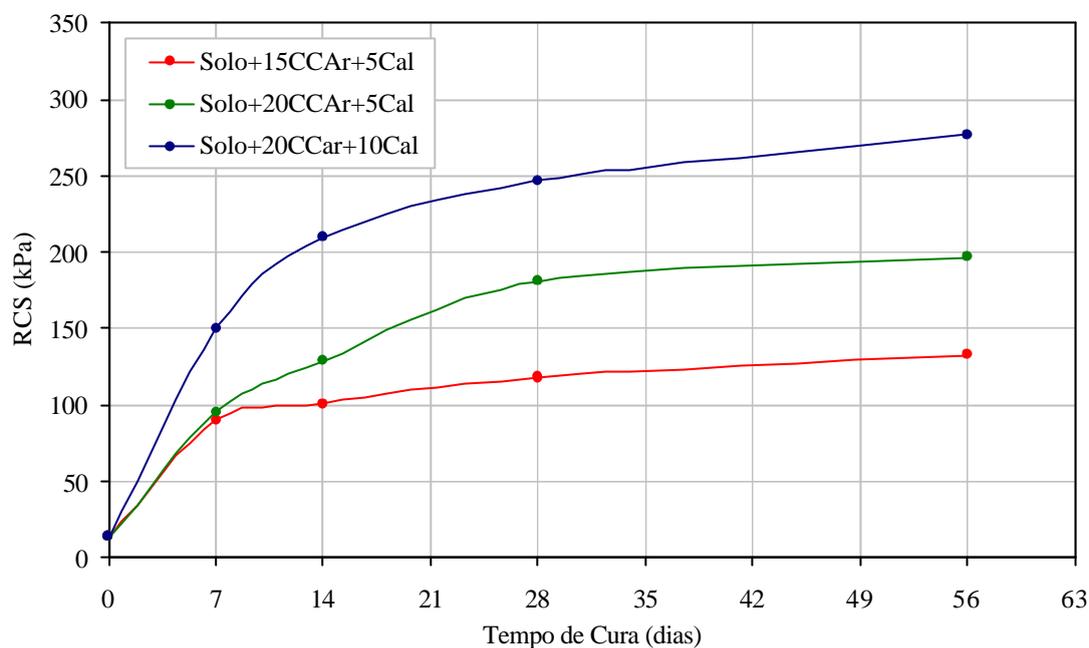


Figura 4. 14 - Evolução da RCS com o tempo de cura das misturas solo-CCAr-cal.

Ali *et al.* (1992) constataram o mesmo comportamento da RCS com o tempo de cura em misturas de areia argilosa-CCA-cal, com altas taxas de incremento iniciais.

O comportamento da RCS das misturas solo-CCAr-cal com o tempo de cura pode ser expresso por médio dos seguintes modelos de ajuste, onde a RCS em kPa é uma função da potência do tempo de cura (t) em dias.

$$\text{Para } 15\% \text{CCAr} + 5\% \text{Cal: } \text{RCS} = 48,44 \cdot t^{0,27}; \quad R^2 = 1 \quad (4.8)$$

$$\text{Para } 20\% \text{CCAr} + 5\% \text{Cal: } \text{RCS} = 56,76 \cdot t^{0,31}; \quad R^2 = 1 \quad (4.9)$$

$$\text{Para } 20\% \text{CCAr} + 10\% \text{Cal: } \text{RCS} = 72,98 \cdot t^{0,36}; \quad R^2 = 1 \quad (4.10)$$

As RCS aos 56 dias de cura das misturas solo-15%CCAr-5%Cal, solo-20%CCAr-5%Cal e solo-20%CCAr-10%Cal são 10, 14 e 20 vezes maiores respectivamente que a RCS do solo natural. Portanto, os ganhos de RCS, com relação à do solo natural, são muito significativas.

As declividades das curvas de ajuste para a mistura com 20% de CCAr e 10% de cal, sugerem que existe a possibilidade de aumentos contínuos de RCS após 56 dias de cura. Isto está de acordo com o observado no difratograma de raios-X desta mistura para 28 dias de cura, que indicou a presença de cal remanescente, disponível para reagir com a sílica amorfa da CCAr.

As curvas correspondentes a 5% de cal (com 15 ou 20% de CCAr) mostram uma tendência à estabilidade, sugerindo que toda a cal disponível reagiu com a sílica disponível na cinza.

#### 4.5.2 Influência dos teores de CCAr e cal

A Figura 4.15 mostra a evolução da RCS em função dos teores de CCAr e cal para 7, 14, 28 e 56 dias de cura. Na origem é colocado o valor médio da RCS do solo natural, que foi de 13,7 kPa.

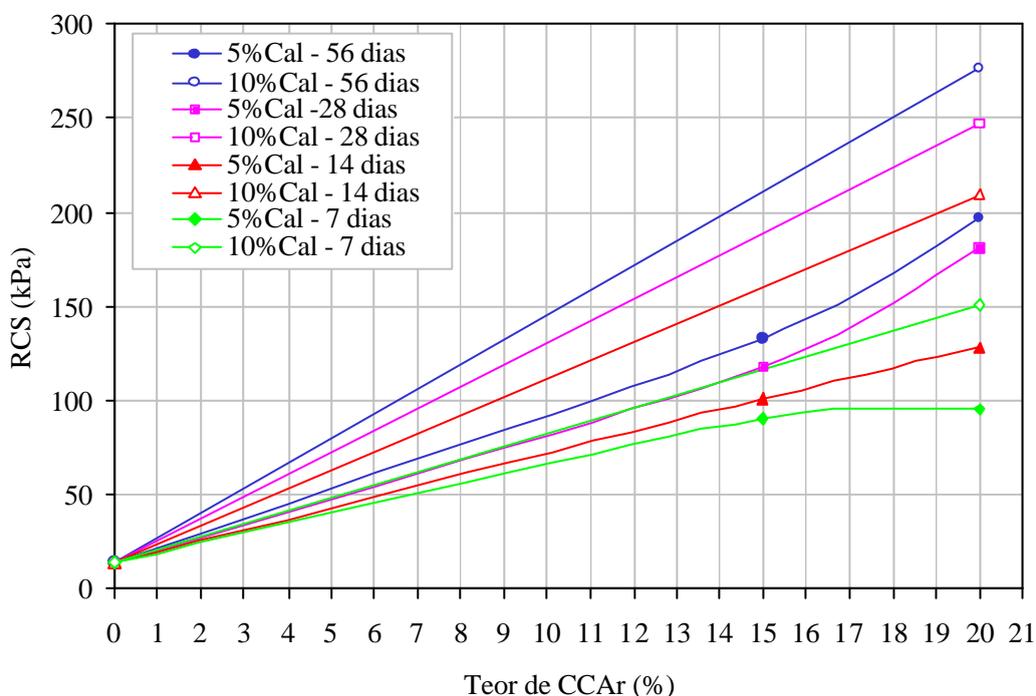


Figura 4. 15 - Evolução da RCS com os teores de CCAr e cal das misturas para 7, 14, 28 e 56 dias de cura.

A RCS aumentou com o aumento dos teores de CCAr e cal, para todos os tempos de cura, sendo máxima para a mistura solo-20%CCAr-10%Cal. Comparando com o solo natural, a RCS da mistura solo, 20% de CCAr e 10% de cal foi 18 e 20 vezes maior, para 28 e 56 dias de cura, respectivamente.

As curvas de ajuste para 5% de cal mostram um aumento de RCS com o aumento da CCAr, porém a taxa de ganho é diferente quando se acrescenta de 0% a 15% de CCAr, do que quando é acrescentado entre 15% e 20% de CCAr.

A variação da taxa de ganho é diferente segundo o tempo de cura. Assim para 7 dias de cura, a RCS da mistura com 15% de CCAr e 5% de cal aumenta 6,6 vezes com relação à RCS do solo natural; no entanto, na mistura solo, 20% de CCAr e 5% de cal a RCS é apenas praticamente igual à RCS da mistura solo, 15% de CCAr e 5% de cal. Isto indica que o tempo de cura de 7 dias é suficiente para que a cal reaja com a maior parte da sílica disponível na mistura com 15% de CCAr, mas na mistura com 20% de CCAr haverá muita sílica amorfa ainda não atacada pelos íons  $\text{Ca}^{++}$ .

Aos 14 dias de cura, o valor da RCS da mistura solo, 20% de CCAr e 5% de cal é 1,3 vezes maior do que a RCS da mistura solo, 15% de CCAr e 5% de cal. Para 28 e 56 dias de cura as razões das RCS das misturas solo-20%CCAr-5%Cal e solo-15%CCAr-5%Cal são iguais, de 1,5. A maior quantidade de sílica amorfa na mistura com 20% de CCAr reage com os íons  $\text{Ca}^{++}$  entre os 7 e os 28 dias de cura. Após 28 dias de cura a sílica amorfa remanescente sem reagir com a cal é praticamente igual nas misturas solo-15%CCAr-5%Cal e solo-20%CCAr-5%Cal.

O comportamento observado da RCS em função do teor de CCAr, para o teor de cal de 5% e diferentes tempos de cura, pode ser expresso mediante os seguintes modelos.

$$7 \text{ dias: } \text{RCS (kPa)} = -0,21 \cdot (\% \text{CCAr})^2 + 8,2 \cdot (\% \text{CCAr}) + 13,7; \quad R^2 = 1 \quad (4.11)$$

$$14 \text{ dias: } \text{RCS (kPa)} = -0,02 \cdot (\% \text{CCAr})^2 + 6,09 \cdot (\% \text{CCAr}) + 13,7; \quad R^2 = 1 \quad (4.12)$$

$$28 \text{ dias: } \text{RCS (kPa)} = 0,29 \cdot (\% \text{CCAr})^2 + 2,63 \cdot (\% \text{CCAr}) + 13,7; \quad R^2 = 1 \quad (4.13)$$

$$56 \text{ dias: } \text{RCS (kPa)} = 0,24 \cdot (\% \text{CCAr})^2 + 4,33 \cdot (\% \text{CCAr}) + 13,7; \quad R^2 = 1 \quad (4.14)$$

O aumento das taxas de incremento de RCS quando se passa de 15% a 20% de CCAr, mantendo um teor de cal de 5%, dever-se-ia a que o aumento do teor de CCAr proporcionaria um maior teor de sílica amorfa capaz de reagir com a cal, favorecendo as reações pozolânicas. Porém, as reações seriam muito lentas, de tal modo que aos 56 dias ainda existiria sílica amorfa e cal disponíveis para reagir.

Quando o teor de cal passa de 5% para 10%, mantendo um teor de 20% de CCAr, as razões de RCS entre as misturas solo-20%CCAr-5%Cal e solo-20%CCAr-10%Cal são de 1,4 para 28 e 56 dias de cura e de 1,6 para 7 e 14 dias de cura. Portanto, o acréscimo de cal, não só aumenta consideravelmente a RCS, mas também acelera as reações pozolânicas com a sílica amorfa da cinza, atingindo maiores RCS nas idades prematuras.

Os resultados obtidos, no que refere à variação da RCS com os teores de CCAr e cal para todos os tempos de cura, são coerentes com as observações de Ali *et al.* (1992) quando pesquisaram a evolução da RCS de uma areia argilosa após 7, 28 e 56 dias de cura, salientando um padrão geral segundo o qual a RCS aumenta rapidamente com a adição de CCA. Muntohar e Hantoro (2000), ensaiando à RCS um solo argiloso estabilizado com CCA e cal, também constataram aumentos de RCS com o aumento dos teores de CCA e cal. Porém, diferentemente do observado por esses autores, não foi possível definir teores ótimos de CCAr e cal, além dos quais a RCS diminui.

Os tipos de solo empregados nas pesquisas de Ali *et al.* (1992) e de Muntohar e Hantoro (2000) apresentavam teores muito maiores de fração fina do que o solo utilizado nesta pesquisa. A areia argilosa de Ali *et al.* (1992), tinha 47% de fração passante na peneira No. 200 (15% de silte, 32% de argila), enquanto o solo da pesquisa de Muntohar e Hantoro (2000) apresentou 91% de fração fina passante na peneira No. 200 (81% de silte e 10% de argila). Portanto, era de esperar-se que o teor ótimo de CCAr e cal capaz de produzir a maior RCS do solo arenoso desta pesquisa fosse maior.

Na Figura 4.12 não foi possível definir com clareza um teor de CCAr e cal, embora para o teor de 5% de cal, a RCS tende a estabilizar-se após 56 dias de cura. A continuidade da pesquisa, ensaiando-se misturas com teores de CCAr e cal diferentes dos aqui empregados, talvez permita a definição de um teor ótimo.

#### 4.5.3 Influência do tempo de espera entre mistura e compactação

A Tabela 4.6 apresenta os valores médios de RCS da mistura solo, 20% de CCAr e 10% de cal, compactadas imediatamente após da mistura e com demoras de 1, 2, 3 e 4 horas. Todos os corpos-de-prova foram compactados a energia normal e curados por 28 dias.

Tabela 4. 6 - Efeito da demora na compactação na RCS da mistura solo-20%CCAr-10%Cal com 28 dias de cura.

Demora na Compactação (h)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	RCS (kPa)
0	13,9	247,2
1	14,1	285,8
2	13,8	242,0
3	13,7	264,7
4	13,8	160,2

A Figura 4.16 mostra graficamente a variação de RCS para a mistura solo, 20% de CCAr e 10% de cal, observando-se uma tendência à diminuição sensível da RCS apenas quando o tempo de espera entre a mistura e a compactação foi de 4 h. Para esse tempo de demora na compactação a resistência foi reduzida 65% da correspondente à compactação imediata. Para 1, 2 e 3 h, as diferenças dos valores de RCS estão na faixa de erros dos ensaios.

Os resultados são diferentes aos obtidos por Núñez (1991) e Sivapullaiah *et al.* (1998) quando estabilizaram com cal solos areio-siltoso e argiloso, respectivamente, mas bem similares aos observados por Holt *et al.* (2000) para o caso de estabilização com cal de um solo contendo caolinita, ilita, vermiculita e quartzo. A queda de resistência pela demora na compactação dever-se-ia à floculação-aglomeração que, sendo que os  $\gamma_d$  e de o teor de umidade de compactação de todos os corpos-de-prova similares, causa redução do índice de vazios e, portanto, diminuição da sucção.

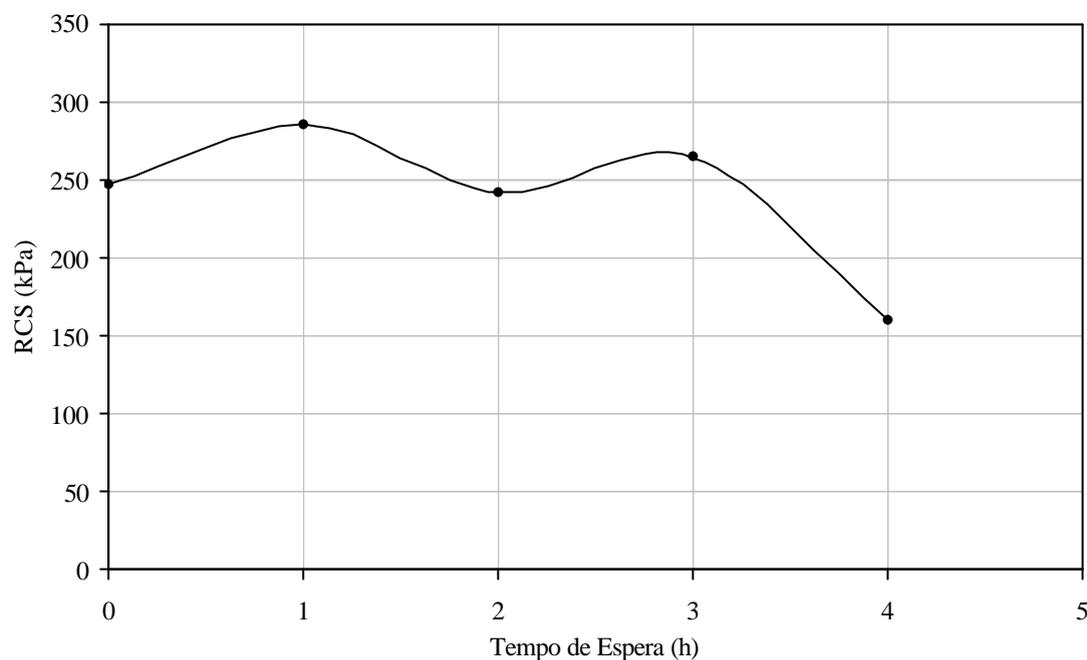


Figura 4. 16 - Evolução da RCS da mistura solo-20%CCAr-10%cal com 28 dias de cura em função do tempo de espera entre a mistura e a compactação a energia normal.

Como o solo da pesquisa apresenta teores muito baixos de fração fina, não era de esperar que a flocculação-aglomeração fosse de considerável influencia em tempos de espera curtos, de algumas horas. Assim, seria lógica a não variação da RCS. De acordo com Osinubi (1988) quando ocorre uma demora na compactação, os produtos da 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. Portanto, a redução de resistência verificada quando a demora entre a mistura e a compactação foi de 4 h, também pode ter sido causada pela formação incipiente de produtos cimentantes, que são rompidos durante a compactação.

#### 4.6 RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E O MÓDULO DE DEFORMABILIDADE SECANTE

A Figura 4.17 apresenta o comportamento do módulo de deformabilidade secante entre a origem e  $0,75\sigma_{rup}$  em função da resistência à compressão simples para cada mistura solo-CCAr-Cal e para todos os tempos de cura.

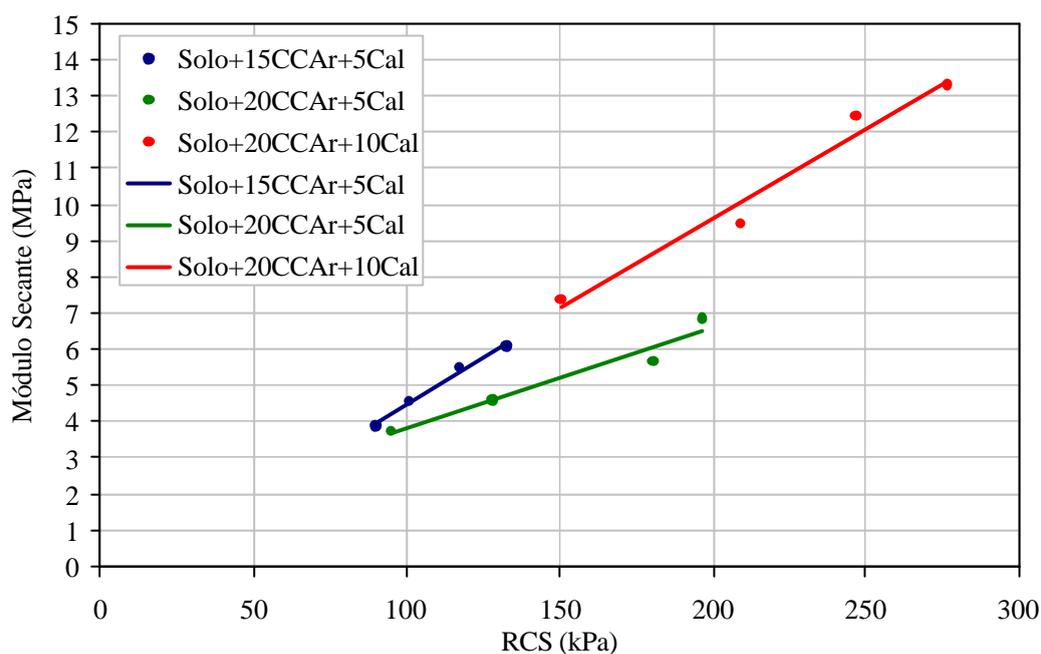


Figura 4. 17 - Relação entre o módulo de deformabilidade secante e a RCS para cada mistura solo-CCAr-cal ensaiada à compressão simples.

Observa-se uma relação linear entre o módulo de deformabilidade secante ( $E_{0,75\sigma_{rup}}$ ) e a RCS para cada uma das misturas ensaiadas à compressão simples, de forma similar ao que assinalou Thompson (1966) para solos de Illinois estabilizados com cal. Para cada mistura foram obtidas os seguintes modelos.

$$\text{Solo-15\%CCAr-5\%Cal: } E_{0,75\sigma_{rup}} \text{ (MPa)} = 0,05 \cdot \text{RCS} - 0,77 ; R^2 = 0,99 \quad (4.15)$$

$$\text{Solo-20\%CCAr-5\%Cal: } E_{0,75\sigma_{rup}} \text{ (MPa)} = 0,03 \cdot \text{RCS} + 1,02 ; R^2 = 0,95 \quad (4.16)$$

$$\text{Solo-20\%CCAr-10\%Cal: } E_{0,75\sigma_{rup}} \text{ (MPa)} = 0,05 \cdot \text{RCS} - 0,24 ; R^2 = 0,97 \quad (4.17)$$

Tal como mostra a Figura 4.18 é possível generalizar um modelo que vincula o módulo de deformabilidade secante entre a origem e  $0,75\sigma_{rup}$  e a resistência à compressão simples, independentemente dos teores de CCAr e cal e do tempo de cura.

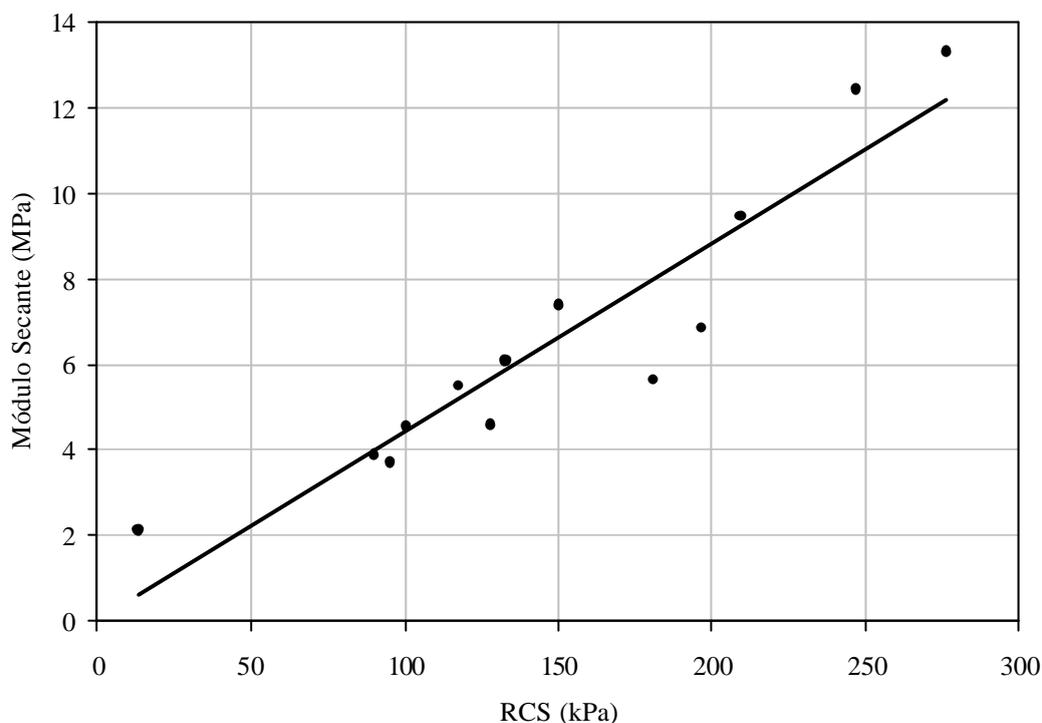


Figura 4. 18 - Relação entre o módulo de deformabilidade secante e a RCS para todas as mistura solo-CCAr-cal e todos os tempos de cura.

A relação entre  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  e a RCS para qualquer mistura solo-CCAr-cal e tempo de cura pode ser resumida pelo seguinte modelo.

$$E_{0,75\sigma_{rup}} \text{ (MPa)} = 0,04 \cdot \text{RCS (kPa)} ; R^2 = 0,87 \quad (4.18)$$

O presente item visou analisar o comportamento tensão-deformação clássico, porém, em termos de dimensionamento de pavimentos o que interessa é o módulo de deformabilidade elástica sob cargas repetidas, conhecido como módulo de resiliência. Tal abordagem não foi feita nesta pesquisa por não dispor-se dos equipamentos de ensaio necessários.

#### 4.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Segundo Seddom e Bhindi (1983) o surgimento de resistência à tração demonstra a ocorrência de cimentação pozolânica. Portanto, foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RCD) em corpos-de-prova de misturas de solo com 15% de CCAr e 5% de cal, com 20% de CCAr e 5% de cal, e com 20% de CCAr e 10% de cal, compactadas na energia Normal, após 14, 28 e 56 dias de cura. A Figura 4.19 mostra um corpo-de-prova ensaiado e o tipo de ruptura frágil apresentada para todas as condições de teores e tempos de cura.



Figura 4. 19 – Tipo de ruptura apresentada nas misturas solo-CCAr-cal no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Os valores médios de resistência à tração por compressão diametral (RCD) das misturas solo-CCAr-cal após 14, 28 e 56 dias de cura são mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4. 7 – Valores médios de RCD para diferentes misturas solo-CCAr-cal e tempos de cura.

TEMPO DE CURA (dias)	RCD (kPa)		
	15CCAr+5Cal	20CCAr+5Cal	20CCAr+10Cal
14	32,0	30,4	46,2
28	56,1	46,1	69,2
56	82,4	62,6	95,0

O solo natural não resiste tensões de tração por ser uma areia com muito pouca fração fina passante na peneira No. 200. Assim, não é de esperar resistências à tração nas misturas solo-CCAr-cal ensaiadas imediatamente depois de compactadas, considerando-se na análise desprezível sua RCD.

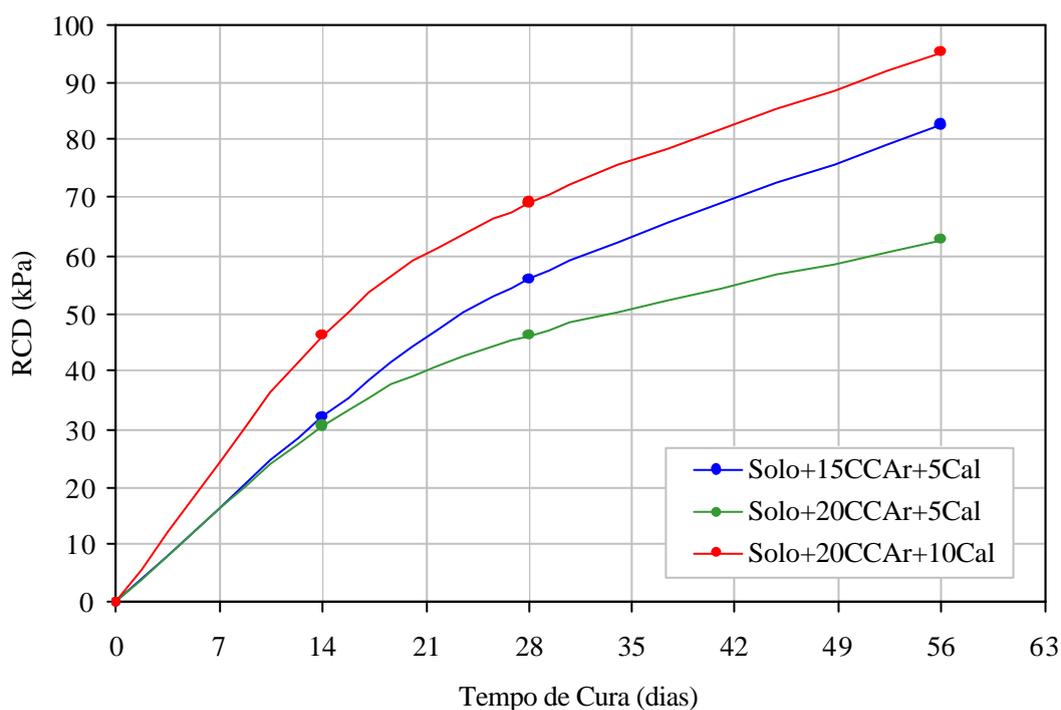


Figura 4. 20 – Evolução da RCD com o tempo de cura para diferentes misturas solo-CCAr-cal.

A Figura 4.20 apresenta a evolução da RCD das misturas de solo com 15% de CCAr e 10% de Cal (15CCAr+5Cal), com 20% de CCAr e 5% de Cal (20CCAr+5Cal)

e com 20% de CCAr e 10% de Cal (20CCAr+10Cal), para tempos de cura de 14, 28 e 56 dias.

Observa-se um rápido aumento de RCD para as três misturas ensaiadas, diminuindo a taxa de crescimento com o aumento do tempo de cura. Com relação a RCD aos 56 dias, a RCD desenvolvida aos 14 variou entre 38,9% e 46,8%, e entre 68,1% e 73,6% aos 28 dias. As declividades finais das curvas de RCD em função do tempo de cura para as três misturas indicariam que após de 56 dias continuariam ocorrendo ganhos de resistência à tração. Coincidentemente com as conclusões de Núñez (1991) para o caso da estabilização com cal de um solo residual de arenito, o tempo de cura é extremamente importante para o desenvolvimento de resistência à tração nas misturas compactadas de solo-CCAr-cal.

Para tempos de cura não inferiores de 14 dias, a evolução da RCD pode ser determinada mediante os seguintes modelos, onde  $t$  é o tempo de cura em dias.

$$\text{Para } 15\% \text{CCAr} + 5\% \text{Cal: } \text{RCD (kPa)} = 36,36 \cdot \text{Ln}(t) - 64,30; R^2 = 1 \quad (4.19)$$

$$\text{Para } 20\% \text{CCAr} + 5\% \text{Cal: } \text{RCD (kPa)} = 23,23 \cdot \text{Ln}(t) - 31,00; R^2 = 1 \quad (4.20)$$

$$\text{Para } 20\% \text{CCAr} + 10\% \text{Cal: } \text{RCD (kPa)} = 35,21 \cdot \text{Ln}(t) - 47,21; R^2 = 1 \quad (4.21)$$

De acordo com Seddom e Bhindi (1983) a fronteira entre as fases estabilizadas e modificadas das misturas solo-cal corresponde a uma RCD de 120 kPa. Seguindo o mesmo critério para as misturas solo-CCAr-cal e extrapolando o modelo 4.21 que relaciona a RCD com o tempo de cura, esse valor fronteira de RCD seria alcançado após 115 dias de cura, para a mistura de solo com 20% de CCAr e 10% de cal.

Na Figura 4.21, onde são apresentadas as variações da RCD em função dos teores de CCAr e cal para as misturas ensaiadas após 14, 28 e 56 dias, pode-se observar que a RCD da mistura solo, 15% de CCAr e 5% de cal é maior que a da mistura solo, 20% de CCAr e 5% de cal para todos os tempos de cura. Alias, a queda de RCD ao passar-se de 15% para 20% de CCAr, mantendo constante o teor de cal, é maior quanto maior é o tempo de cura. O resultado observado é diferente com o observado para a resistência à compressão simples.

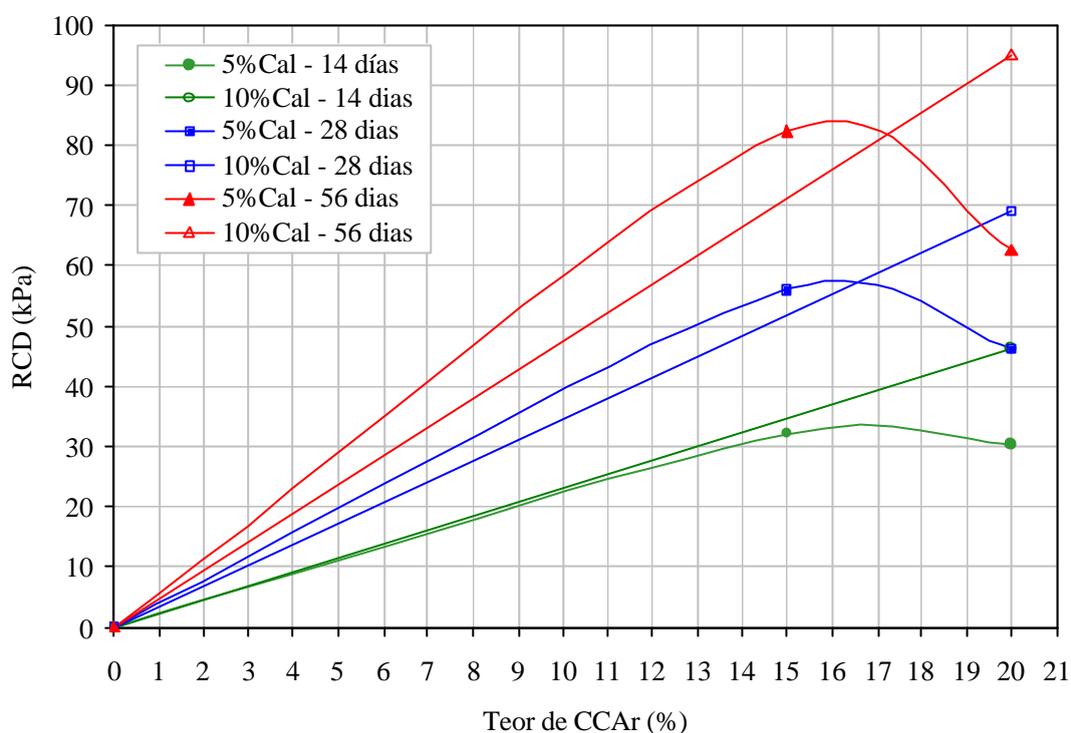


Figura 4. 21 - Evolução da RCD com os teores de CCAr e cal das misturas para 7, 14, 28 e 56 dias de cura.

Por outro lado, na análise difratométrica realizada em amostras das misturas ensaiadas à compressão simples após 28 dias de cura, as misturas de solo com 20% de CCAr e 10% de cal mostraram uma maior quantidade de produtos cimentantes, que a mistura com 15% de CCAr e 5% de cal. Portanto, também do ponto de vista das reações pozolânicas, os resultados obtidos nos ensaios de RCD não foram os esperados.

O comportamento à tração das misturas solo-CCAr-cal foi similar para todos os corpos-de-prova ensaiados e para todos os tempos de cura, portanto, fatores como a heterogeneidade do solo e da cinza e as impurezas da cal não podem ser consideradas como causas que hajam afetado nos resultados.

Uma possível explicação seria que os pesos específicos secos dos corpos-de-prova das misturas com 15% de CCAr e 5% de cal foram superiores aos obtidos para as

misturas com 20% de CCAr e 5% de cal e com 20% de CCAr e 10% de cal, para todos os tempos de cura, tal como mostrado na Tabela 4.8.

Tabela 4. 8 – Pesos específicos secos médios dos corpos-de-prova das mistura solo-CCAr-cal ensaiados à RCD após de diferentes tempos de cura.

TEMPO DE CURA (dias)	PESO ESPECIFICO SECO (kN/m <sup>3</sup> )		
	15%CCAr+5%Cal	20%CCAr+5%Cal	20%CCAr+10%Cal
56	15,5	13,8	13,9
28	15,2	14,4	14,2
14	15,2	14,5	14,1

Para uma dada energia de compactação, é provável que os pesos específicos dos corpos-de-prova sejam maiores quanto menores teores de CCAr e, em menor medida, os de cal, por ser a densidade real dos grãos da CCA muito baixa. Portanto, uma verificação da hipótese formulada como causa da aparente contradição entre os resultados esperados e os obtidos, deveria ser feita, repetindo os ensaios de RCD da mistura solo-15%CCAr-5%Cal procurando pesos específicos similares aos obtidos para as outras misturas, o que foi impossível nos prazos da pesquisa.

#### 4.8 RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SIMPLES E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Thompson (1965) salientou que o quociente RCD/RCS para misturas de solo-cal varia de 0,10 a 0,15 (valor típico de 0,13) sem importar o tipo ou teor de cal. Procurou-se uma relação similar para as misturas solo-CCAr-cal. Contudo, dada a reduzida confiabilidade dos resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral para a mistura solo-15%CCAr-5%Cal, esta não foi incluída na análise.

A Figura 4.22 mostra a relação entre a RCS e a RCD para as misturas de solo com 20% de CCAr e 5% de cal e com 20% de CCAr e 10% de cal e para todos os

tempos de cura. Observa-se que é possível estabelecer uma relação linear entre as resistências expressas pelo seguinte modelo.

$$\text{RCD} = 0,29 \text{ RCS} ; \quad R^2 = 0,90 \quad (4.22)$$

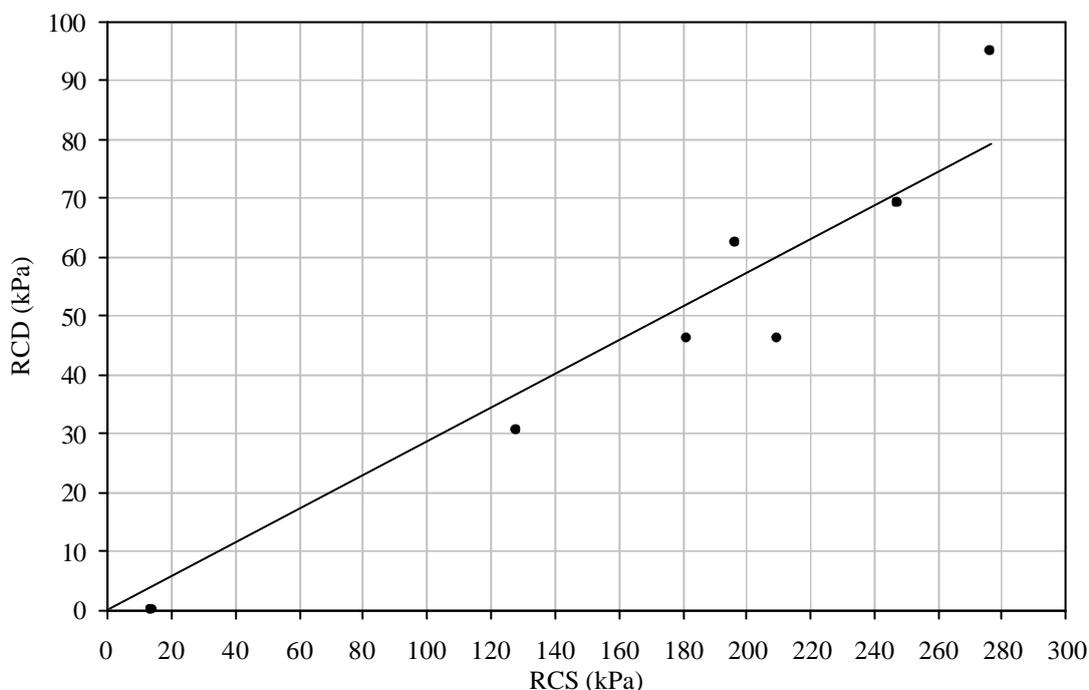


Figura 4. 22 - Relação entre a RCS e a RCD das mistura solo-CCAr-cal.

Como o ganho de resistência à compressão simples na estabilização com CCA e cal de solos arenosos é devido à formação de produtos cimentantes, resultantes das reações pozolânicas entre a sílica amorfa da CCA e a cal, é lógico que a presença de produtos cimentantes cause similares ganhos de resistência à tração.

#### 4.9 DURABILIDADE

Ensaio de durabilidade de misturas solo-15%CCAr-5%Cal, solo-20%CCAr-5%Cal e solo-20%CCAr-10%Cal, compactadas na energia Normal, foram realizados aplicando o método Iowa, proposto por Hoover *et al.* (1958). Corpos-de-prova de cada mistura foram submetidos, após 28 dias de cura, a 12 ciclos de molhagem e secagem e

logo ensaiados à resistência à compressão simples. Outros corpos-de-prova das mesmas misturas e compactadas na mesma energia, foram mantidos curando durante o mesmo tempo e submetidos a ensaios de resistência à compressão simples, simultaneamente com os corpos-de-prova submetidos aos ciclos. A Figura 4.23 compara os estados de um corpo-de-prova ao final dos 12 ciclos de molhagem e secagem com o de um corpo-de-prova não submetido aos ciclos, antes de ser ensaiado.



Figura 4. 23 – Estado das amostras imediatamente antes de ser ensaiadas. Esquerda: amostra não submetida a ciclos. Direita: amostra submetida a ciclos.

Não se observam grandes desgastes das amostras após serem submetidas aos 12 ciclos de molhagem e secagem, em comparação com as amostras não submetidas a ciclos. Uma delgada crosta, de cor branca, formou-se na face externa dos corpos-de-prova submetidos a ciclos, devido à ação dos sais da água potável utilizada nos ciclos de molhagem e a carbonatação da cal que não tinha reagido durante os 28 dias de cura pela ação do ar nos ciclos de secagem. Na Figura 4.23 se observa que após 24 horas de secagem, a seção inferior do corpo-de-prova permanece mais úmida.

Os corpos-de-prova apresentaram ruptura frágil quando submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, como se mostra na Figura 4.24.



Figura 4. 24 – Ruptura frágil apresentada na amostra submetida a ciclos de molhagem e secagem.

A influência dos ciclos de molhagem e secagem na resistência à compressão simples foi avaliada através do quociente de resistência entre as amostras submetidas e as não submetidas aos ciclos. Os valores do quociente de resistência ( $Q_r$ ), assim como os valores médios de RCS das misturas de solo com 15% de CCAr e 5% de cal, com 20% de CCAr e 5% de cal, e com 20% de CCAr e 10% de cal sem e com ciclos são mostrados na Tabela 4.9.

Tabela 4. 9 – RCS médias das amostras submetidas e não submetidas a ciclos de molhagem e secagem e influência dos ciclos na RCS.

TIPO DE MISTURA (%CCAr+%Cal)	RCS (kPa)		$Q_r$ (%)
	SEM CICLOS	COM CICLOS	
15+5	209,6	134,0	64
20+5	196,8	140,8	72
20+10	364,1	279,2	77

Para as três misturas ensaiadas à durabilidade, verificou-se uma menor RCS para as amostras submetidas aos 12 ciclos de molhagem e secagem, respeito às RCS das misturas sem ciclos. O quociente de resistência ( $Q_r$ ) aumentou com os teores de CCAr e

cal. Porém, a RCS da mistura com 20% de CCAr e 10% de cal submetida a ciclos foi maior que as RCS das misturas com 15% de CCAr e 5% de cal e com 20% de CCAr e 5% de cal não submetidas a ciclos.

Marcon (1977) adotou o limite mínimo de  $Q_r$  de 80% para a durabilidade a ciclos de molhagem e secagem para a estabilização com cal de solos. Seguindo este critério a durabilidade das misturas solo-CCAr-cal não seria satisfatória, devido a que não atingiram esse valor mínimo. O valor de  $Q_r$  mais próximo foi de 77% para a mistura com 20% de CCAr e 10% de cal.

Ali *et al.* (1992), efetuando ensaios de durabilidade de misturas de arena argilosa com CCA e cal, observaram quocientes de resistência para composições de 9% cal+12% CCA e 9% cal+18% CCA com tempos de cura de 28 dias, de 60% e 57% respectivamente. Os quocientes de resistência obtidos nesta pesquisa foram maiores para as três misturas ensaiadas à durabilidade, quando comparado aos observados por Ali *et al.* (1992).

Levando em conta a comparação dos resultados obtidos na pesquisa com os de Ali *et al.* (1992) e considerando a baixa atividade pozolânica da CCAr utilizada na pesquisa, pode-se considerar como aceitáveis os valores de  $Q_r$  obtidos para as misturas com 20% de CCAr e 5% de cal e com 20% de CCAr e 10% de cal, principalmente para esta última, visando a utilização da estabilização do solo com CCAr e cal em pavimentos de baixo e médio volume de tráfego. Porém, estima-se necessário aprofundar a pesquisa em relação à durabilidade, particularmente mediante verificações do comportamento no campo, para ajustar um valor limite mínimo de aceitação de quociente de resistência para o caso de estabilização de solos com CCA e cal.

## 5 CARACTERÍSTICAS DAS CCA INCINERADAS A TEMPERATURA CONTROLADA E SUA INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DAS MISTURAS SOLO-CCA-CAL

### 5.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE INCINERAÇÃO NAS CCA

O processo de incineração de casca de arroz na mufla para produzir cinza de casca de arroz (CCA) a temperaturas controladas de 500°C, 650°C, 800°C e 900°C, desenvolveu-se em turnos para cada temperatura. Durante a queima, observou-se que a combustão da matéria orgânica iniciava quando a temperatura da mufla atingia os 300-400°C e finalizava aproximadamente aos 500°C. Considerou-se finalizada a combustão da matéria orgânica quando não havia mais emissão de fumaça da mufla.

A Figura 5.1 mostra as diferenças de aparência entre a casca de arroz e a CCA<sub>TC</sub> antes e depois da incineração. Pode-se observar uma redução significativa de volume após a queima, devida à combustão de matéria orgânica da casca.



Figura 5. 1 - Casca de arroz e da cinza de casca de arroz antes e depois da incineração na mufla. Esquerda: casca de arroz. Direita: cinza de casca de arroz.

As perdas de massa durante a incineração, medidas em peso antes e depois do processo são indicadas na Tabela 5.1 para as diferentes temperaturas e os distintos turnos. Pode-se observar a forte diminuição em peso da cinza produzida mediante incineração da casca de arroz para todas as temperaturas. A razão entre os pesos da

cinza e da casca fica na faixa de 15 - 20%, confirmando resultados apresentados por Ali *et al.* (1992). Os outros elementos componentes da casca (celulose, lignina, água) se volatilizam em maior ou menor medida com a queima. Os resultados também são coincidentes com as observações feitas por Juliano (1985) que assinala que a casca de arroz constitui aproximadamente 20% em peso de cinza, quando incinerada.

Tabela 5. 1 - Pesos da casca de arroz e da cinza da casca de arroz antes e depois de cada turno para diferentes temperaturas de incineração.

Turno	T = 500 °C			T = 650 °C			T = 800 °C			T = 900 °C		
	Peso Casca (g)	Peso Cinza (g)	Razão Peso Cinza - Casca (%)	Peso Casca (g)	Peso Cinza (g)	Razão Peso Cinza - Casca (%)	Peso Casca (g)	Peso Cinza (g)	Razão Peso Cinza - Casca (%)	Peso Casca (g)	Peso Cinza (g)	Razão Peso Cinza - Casca (%)
1	15	2,9	19,3	29,30	5,00	17,1	37,11	6,32	17,0	34,16	5,92	17,3
2	21	3,7	17,6	29,70	5,07	17,1	42,26	7,08	16,8	35,00	5,93	16,9
3	28	4,9	17,5	31,61	5,65	17,9	42,04	7,08	16,8			
4				32,01	5,48	17,1	42,05	7,06	16,8			
5				32,33	5,46	16,9	44,01	7,37	16,7			
6				35,04	6,03	17,2	42,21	7,10	16,8			
7				35,10	6,02	17,2	43,52	7,34	16,9			
8				35,84	6,10	17,0	42,43	7,16	16,9			
9				35,90	6,11	17,0						
10				36,09	6,21	17,2						
Total	64	11,5	18,2	332,92	57,13	17,2	335,63	56,51	16,8	69,16	11,85	17,1

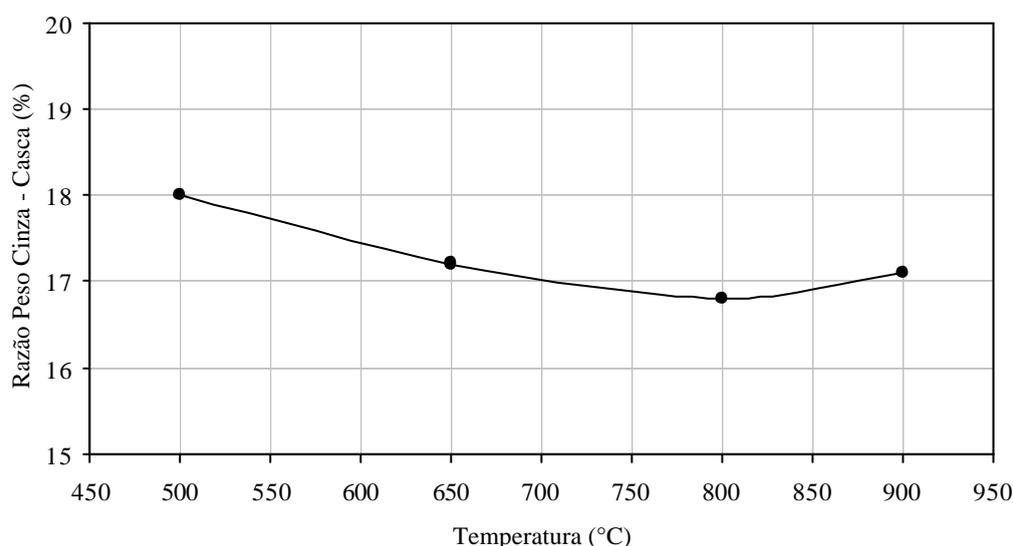


Figura 5. 2 - Razão de pesos cinza de casca de arroz – casca de arroz em função da temperatura de incineração da casca de arroz.

As perdas em peso da casca tendem a diminuir quando a temperatura de incineração aumenta até os 650°C, como se observa na Figura 5.2, estabilizando-se a razão cinza - casca além dessa temperatura.

As características visuais das cinzas de casca de arroz para as diferentes temperaturas de incineração são apresentadas na Figura 5.3. Observa-se que as cinzas apresentam aparência de fibras que são tanto mais alongadas, pontiagudas e finas quanto maior é a temperatura de incineração. Assim, a cinza de casca de arroz incinerada a temperatura controlada de 900°C ( $CCA_{TC900}$ ) tem mais vazios. Ao tato, a cinza de casca de arroz incinerada a temperatura controlada de 500°C ( $CCA_{TC500}$ ) é frágil, desmanchando-se com facilidade, aumentando a dureza das cinzas ao aumentar a temperatura de queima.



Figura 5. 3 – Aparências das cinzas incineradas a diferentes temperaturas controladas. Acima à esquerda: CCA à temperatura de 500°C. Acima à direita: CCA à temperatura de 650°C. Abaixo à esquerda: CCA à temperatura de 800°C. Abaixo à direita: CCA à temperatura de 900°C.

As cores das cinzas mudam com a temperatura de incineração. A  $CCA_{TC500}$  é de cor cinza com pontos pretos, a  $CCA_{TC650}$  apresenta uma cor branca cinza com tonalidades cor-de-rosa. A tonalidade cor-de-rosa é mais intensa para a  $CCA_{TC800}$ , mais basicamente segue sendo de cor branca. Enquanto a  $CCA_{TC900}$  tendo a mesma cor e tonalidades relativas à  $CCA_{TC800}$ , tem a peculiaridade de apresentar a maior concentração relativa de tonalidades pretas. Segundo Boateng e Skeete (1990), temperaturas muito altas e longos tempos de incineração produzem cinzas cor-de-rosa representativas de sílica em forma de cristobalita e tridimita. A contradição aparente poderia ser causada por possíveis defeitos de incineração da mufla utilizada, com transformação de parte da matéria orgânica em carvão.

Segundo a proposta qualitativa de Houstin (1972) as  $CCA_{TC500}$  e  $CCA_{TC650}$  poderiam ser classificadas como cinzas de baixo conteúdo de carvão, no entanto as  $CCA_{TC800}$  e  $CCA_{TC900}$  classificariam como cinzas livres de carvão. As cores brancas são indicadoras de oxidação do carvão na cinza (Boateng e Skeete, 1990).

Os difratogramas de raios-X das amostras de  $CCA_{TC500}$ ,  $CCA_{TC650}$ ,  $CCA_{TC800}$ ,  $CCA_{TC900}$  realizados com o difratômetro da Facultad de Química da Universidad de la República são mostrados na Figura 5.4, onde também é colocado o difratograma de raios-X da  $CCAr$ , para efeitos de comparação. Para uma melhor visualização, os mesmos resultados são colocados na Figura 5.5, deslocando verticalmente no eixo das intensidades expressas em unidades arbitrárias (ua) os difratogramas de raios-X das amostras  $CCA_{TC650}$ ,  $CCA_{TC800}$ ,  $CCA_{TC900}$ .

Os difratogramas de raios-X das amostras da  $CCA_{TC500}$ ,  $CCA_{TC650}$ ,  $CCA_{TC800}$  são muito similares, não apresentando picos. A não existência de pico indica que estas cinzas têm estruturas amorfas. As três cinzas mostram difratogramas com uma região de maior intensidade correspondente a cristobalita. As  $CCA$  incineradas a temperaturas controladas de 500°C, 650°C e 800°C são mineralogicamente similares contendo cristobalita amorfa.

A  $CCA_{TC900}$  apresenta um pico de grande intensidade para um ângulo de difração ( $2\theta$ ) de 22° e outro pico de menor intensidade para  $2\theta$  de 36,35°, ambos os indicativos de cristais de cristobalita. Entre os 800°C e os 900°C inicia a cristalização da sílica, como era de esperar-se segundo Boateng e Skeete (1990).

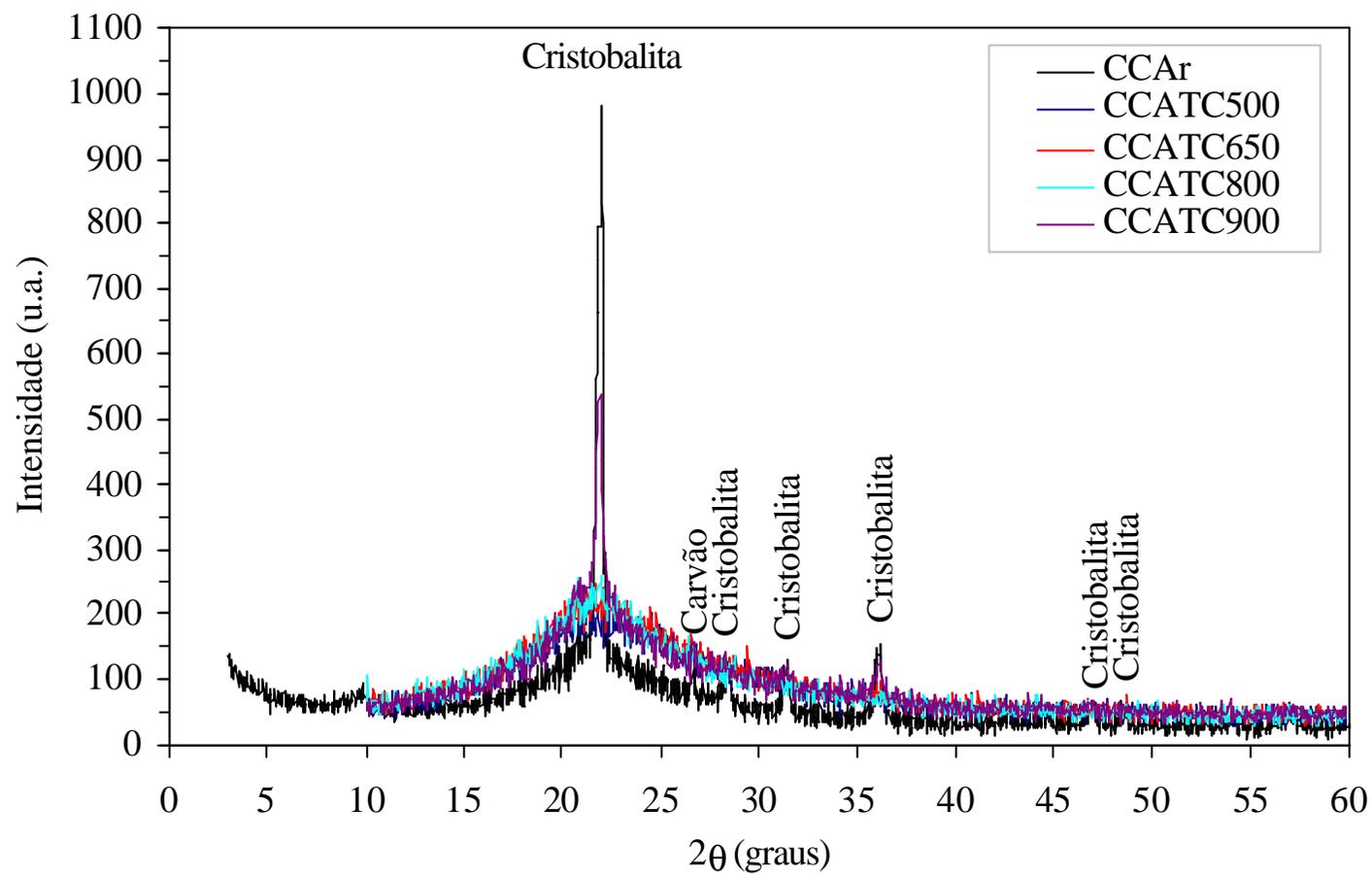


Figura 5. 4 - Difratogramas de raios-X das amostras das cinzas de casca de arroz incineradas a temperaturas controladas e da cinza de casca de arroz residual.

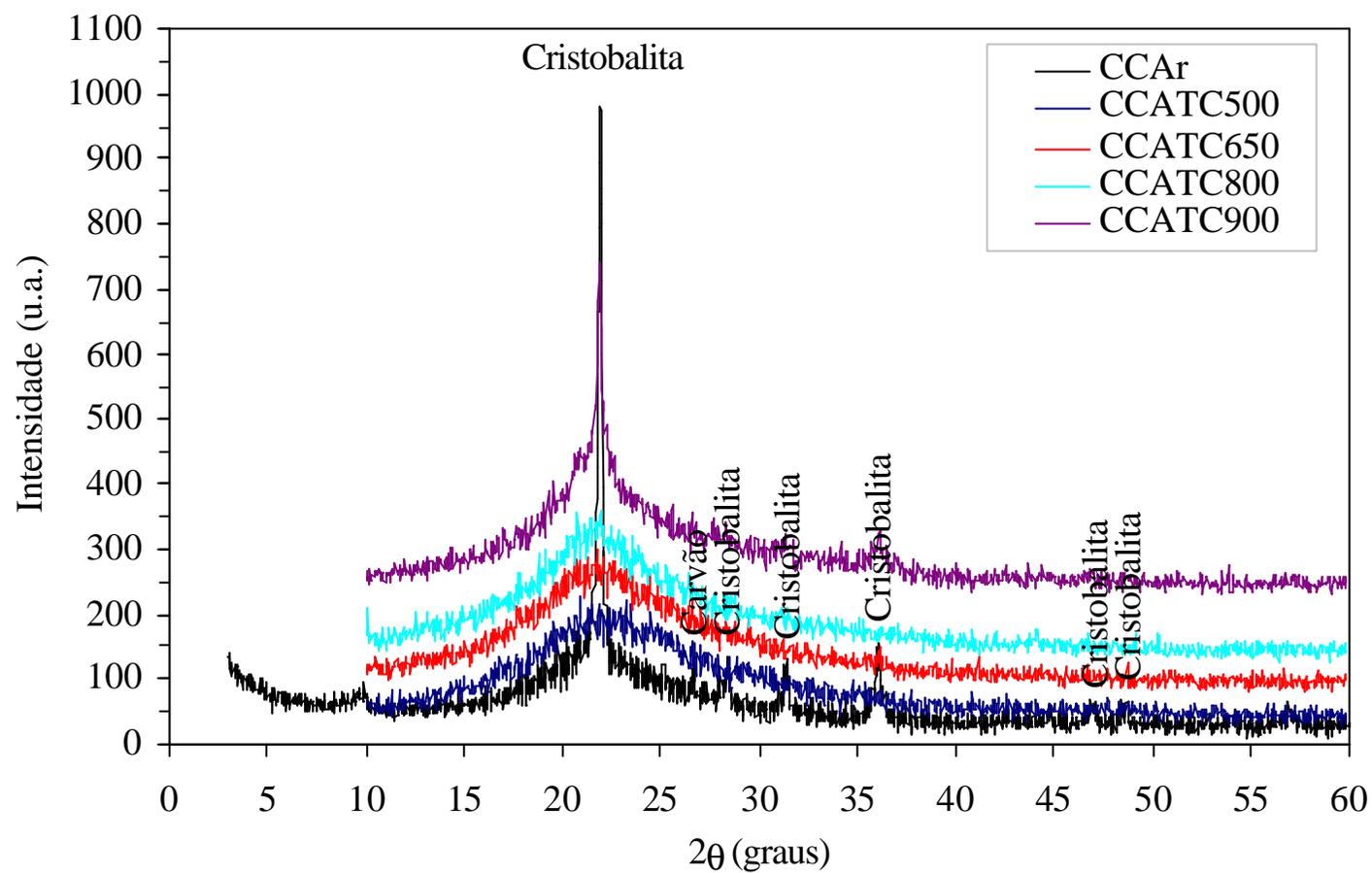


Figura 5. 5 - Difratogramas de raios-X das CCATC e da CCAr com as mostras da CCATC650, CCATC800 e CCATC900 deslocadas no eixo das intensidades.

Os picos de maiores intensidades das amostras da  $CCA_{TC900}$  e  $CCAr$  são concordantes, porém a intensidade do pico da  $CCAr$ , no ângulo de difração de  $22^\circ$ , é maior que o pico da  $CCA_{TC900}$ , indicando maior teor de sílica cristalina na amostra da  $CCAr$ . As temperaturas desenvolvidas no forno de queima da casca de arroz da empresa ARROZUR seriam maiores de  $900^\circ C$ , influenciando também o modo de incineração. No entanto, o difratograma de raios-X da amostra de  $CCA_{TC900}$  não possibilita observar presença de carvão, contrariando o que foi concluído na análise qualitativa das  $CCA_{TC}$ . A representatividade da amostra, muito pequena em comparação com o volume queimado (2 g) poderia dificultar a visualização de carvão, que deveria estar presente.

A modalidade e as temperaturas de incineração da casca de arroz influem na estrutura mineralógica das cinzas produzidas, obtendo-se cinzas amorfas para temperaturas inferiores aos  $800^\circ C$  para um tempo de incineração de 4 h. Contudo, Smith e Kamwanja (1986) observaram formação de sílica cristalina em pequenas proporções para temperaturas inferiores a  $800^\circ C$  mantidas durante 12 h. Portanto, mais outro fator de influência no tipo de cinza produzido é o tempo de incineração da casca. Esta é uma questão a ser avaliada em pesquisas futuras.

A variação do teor de matéria orgânica remanescente nas cinzas com a temperatura de incineração, determinado pelo ensaio de calcinação é apresentada na Tabela 5.2 e na Figura 5.6. Os resultados são expressos em perdas de peso a  $500^\circ C$  e  $1000^\circ C$ , colocando-se também na Tabela 5.2 os resultados obtidos para a  $CCAr$ .

Tabela 5. 2 - Perdas de matéria orgânica por calcinação das cinza da casca de arroz a temperatura controlada e residual.

Mostra	Perdas a $550^\circ C$ (%)	Perdas a $1000^\circ C$ (%)
$CCAr$	18,1	18,7
$CCA_{TC500}$	6,6	7,8
$CCA_{TC650}$	3,2	4,1
$CCA_{TC800}$	---	2,3
$CCA_{TC900}$	---	0,3

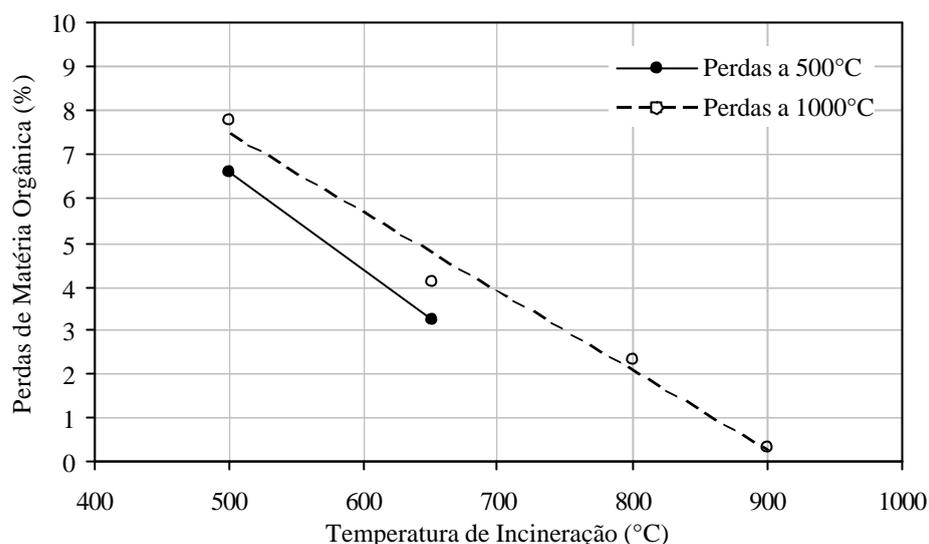


Figura 5.6 - Evolução das perdas de matéria orgânica por calcinação com a temperatura de incineração para as CCA a temperatura controlada.

As perdas de matéria orgânica por calcinação a 500°C e 1000°C diminuem linearmente com o aumento da temperatura de incineração da casca de arroz. Uma notável diferença nas perdas de matéria orgânica para as duas temperaturas de calcinação se observa entre a cinza de casca de arroz residual e as cinzas de casca de arroz a temperaturas controladas. Portanto, o controle da temperatura e o método de incineração são de fundamental importância, visando produzir cinzas de casca de arroz de elevada atividade pozzolânica. Contudo, para a temperatura de incineração de 900°C, ainda existe uma remanescente de matéria orgânica de 0,3%, porém desprezível.

Petry e Glazier (2005) concluíram que a estabilização com cal de solos com 6% de matéria orgânica é economicamente impraticável. O teor de matéria orgânica da cinza de casca de arroz para a temperatura de incineração de 500°C é de 7,8%, sendo relativamente elevado para os propósitos de estabilização, segundo os mesmos autores. Para a CCA incinerada a 650°C, o teor de matéria orgânica é ainda relativamente elevado, de 4,1%. Já para a CCA<sub>TC</sub> de 800°C o teor de matéria orgânica é de 2,3%. Portanto, para evitar os efeitos da matéria orgânica sobre a atividade pozzolânica seria recomendável queimar a casca de arroz a temperaturas superiores aos 650°C.

Conclui-se que para as cinzas pesquisadas a faixa ótima de temperaturas de incineração, visando a estabilização de solos, é de 650 a 800°C. Esta faixa permitiria produzir, de forma controlada, cinzas com teores desprezíveis de matéria orgânica ou carvão e com estruturas amorfas, portanto, cinzas com a máxima reatividade pozolânica possível. Porém, salienta-se que em estudos futuros dever-se-á avaliar a influência do tempo de incineração nas cinzas produzidas.

## 5.2 DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X DAS MISTURAS COM CCA A TEMPERATURA CONTROLADA E CAL

Os difratogramas de raios-X das misturas solo, 15% de cinzas produzidas a temperatura controlada de 650°C e 800°C na mufla, e 5% de cal ( $15CCA_{TC650}+5Cal$  e  $15CCA_{TC800}+5Cal$ , respectivamente) com 28 dias de cura, são mostrados nas Figuras 5.7 e 5.8. Nelas incluem-se os difratogramas do solo sem tratar e das correspondentes cinzas a temperatura controlada utilizadas nas misturas.

No difratograma de raios-X da mistura  $15CCA_{TC650}+5Cal$  com 28 dias de cura, na Figura 5.7, observam-se novos picos, comparados com os correspondentes ao solo, para os ângulos de difração ( $2\theta$ ) 15,01°, 23,65°, 24,34°, 27,88°, 30,43° e 37,67°. Esses picos correspondem à albita, um silicato-aluminato de cálcio ((Ca)Al(Si, Al)<sub>3</sub>O<sub>8</sub>). Os picos de quartzo do solo permanecem na mistura com maiores intensidades, no entanto os picos dos argilo-minerais do solo desaparecem com a estabilização. A região de altas intensidades para  $2\theta$  entre 15° e 27°, correspondente à sílica amorfa da cinza de casca de arroz produzida por incineração a temperatura controlada de 650°C, diminuiu em intensidade no difratograma de raios-X da mistura.

Portanto, a mistura  $15CCA_{TC650}+5Cal$  com 28 dias de cura se compõe de albita e quartzo. A albita é um produto pozolânico, sua presença demonstra que as reações pozolânicas têm lugar na mistura com 28 dias de cura. Estas reações se produzem entre a sílica da cinza de casca de arroz e a cal, o que se comprova pela diminuição da intensidade da sílica amorfa entre os difratogramas do solo e da mistura, devido a seu consumo durante as reações. Algumas reações entre a cal e os argilo-minerais do solo acontecem, explicando o desaparecimento dos picos correspondentes à montmorilonita e à caolinita.

No difratograma de raios-X da mistura 15CCA<sub>TC800</sub>+5Cal com 28 dias de cura, na Figura 5.8, observam-se novos picos, com relação ao solo, para os ângulos de difração ( $2\theta$ ) de 15,01°, 23,65°, 24,34°, 27,88°, 29,82°, 30,43° e 53,14°, correspondentes à albita. Os picos de quartzo do solo permanecem na mistura, sendo em geral de maiores intensidades, no entanto os picos dos argilo-minerais do solo desaparecem. A região de altas intensidades correspondente à sílica amorfa da cinza de casca de arroz produzida por incineração a temperatura controlada de 800°C, diminuiu em intensidade no difratograma de raios-X da mistura.

A mistura 15CCA<sub>TC800</sub>+5Cal é composta de albita e quartzo. A ocorrência de reações pozolânicas na mistura 15CCA<sub>TC800</sub>+5Ca com 28 dias de cura, é verificada pelos novos picos de albita. A diminuição da intensidade da sílica amorfa entre os difratogramas do solo e da mistura é devida a seu consumo durante as reações, que se desenvolvem entre a cal e a sílica da cinza de casca de arroz produzida à temperatura controlada de 800°C. O desaparecimento dos picos correspondentes à montmorilonita e à caolinita no difratograma da mistura, indica que aconteceram algumas reações entre a cal e os argilo-minerais do solo.

A Figura 5.9 compara os difratogramas de raios-X das duas misturas realizadas com as CCA<sub>TC</sub> de 650°C e 800°C, observando-se que, para iguais teores de CCA<sub>TC</sub> e cal e mesmo tempo de cura (28 dias), não há grandes diferenças na mineralogia das misturas. Portanto, para o caso pesquisado e considerando-se que as mineralogias das CCA<sub>TC</sub> de 650°C e 800°C são iguais, as semelhanças dos difratogramas de raios-X indicariam que a atividade pozolânica das cinzas de casca de arroz é independente das temperaturas de incineração controlada na faixa entre 650°C e 800°C.

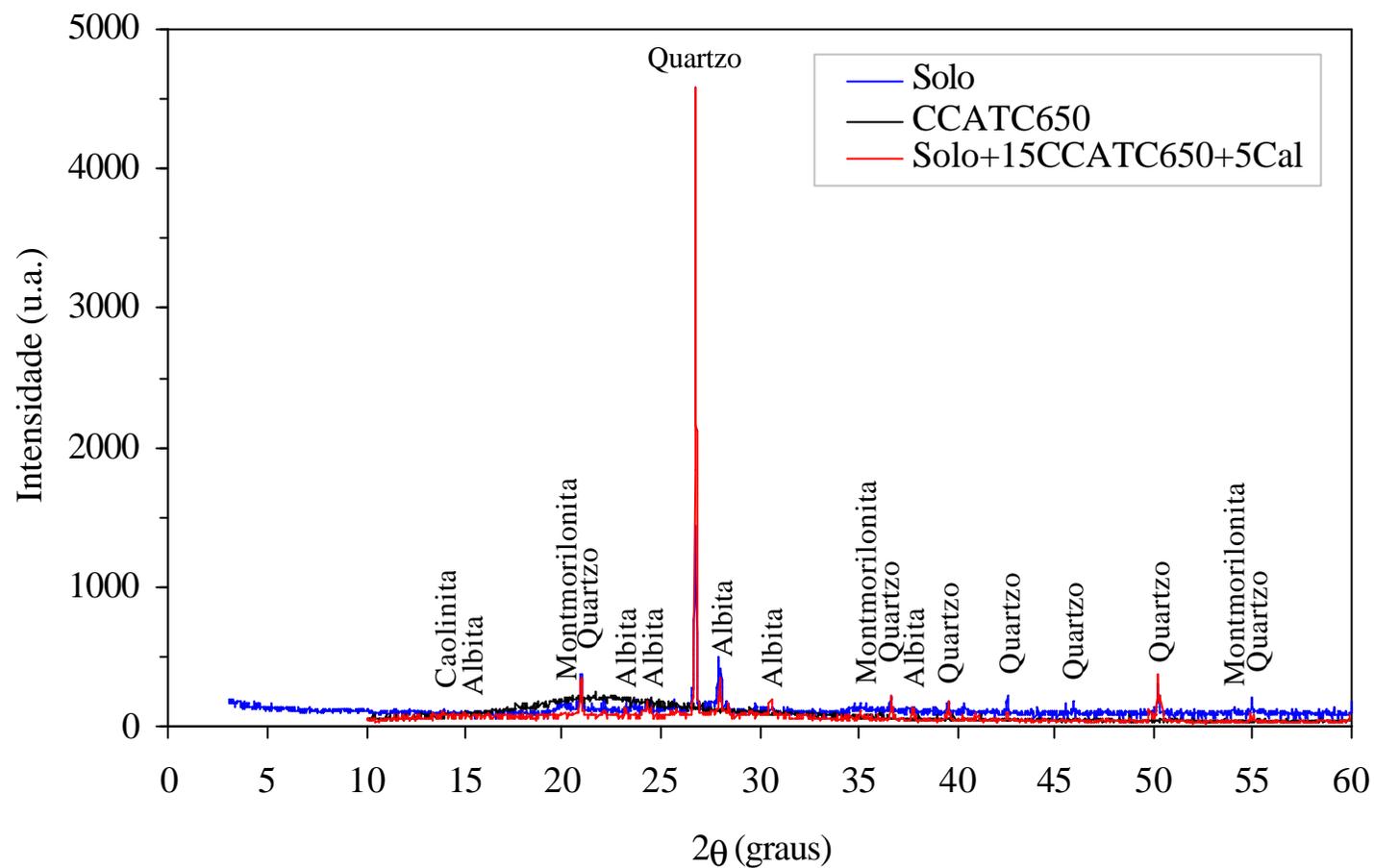


Figura 5. 7 - Difratoograma de raios-X da amostra da mistura solo-15%CCA<sub>TC650</sub>-5%Cal curada 28 dias, da CCA<sub>TC650</sub> e do solo.

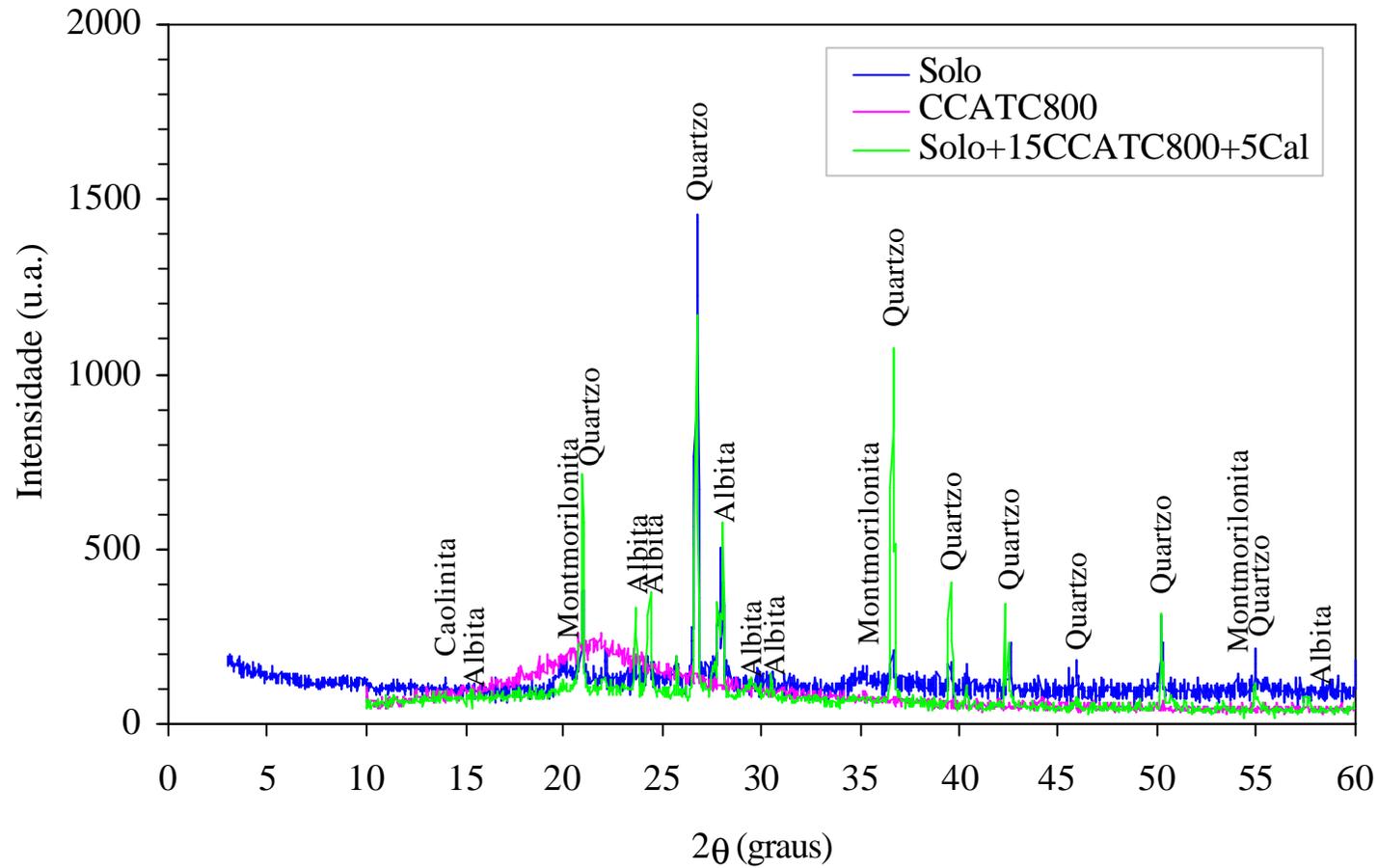


Figura 5. 8 - Difratoograma de raios-X da amostra da mistura solo-15%CCATC800-5%Cal curada 28 dias, do solo e da CCATC800.

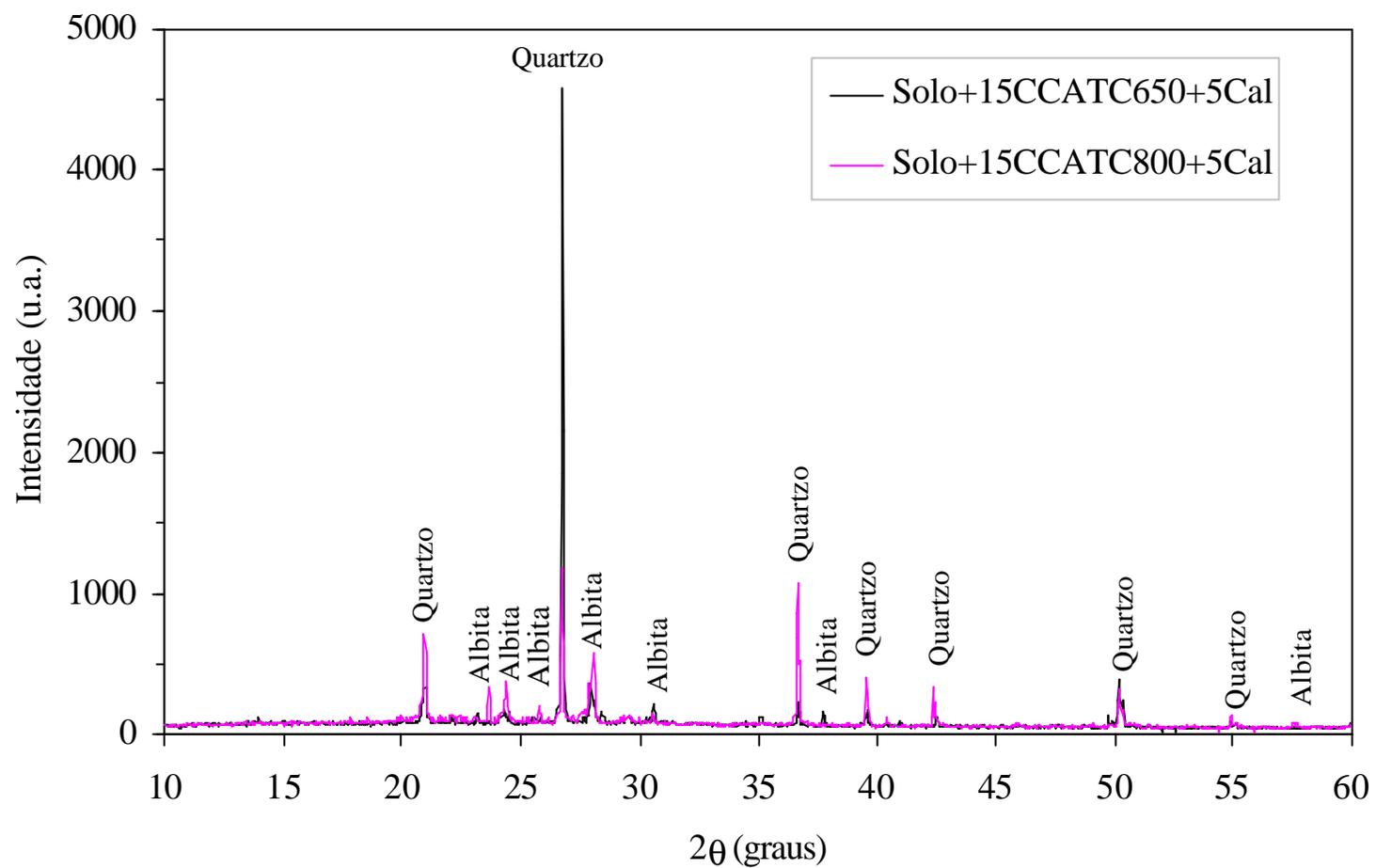


Figura 5. 9 - Difratogramas de raios-X das misturas realizadas com as cinzas de casca de arroz a temperaturas controladas de 650°C e 800°C.

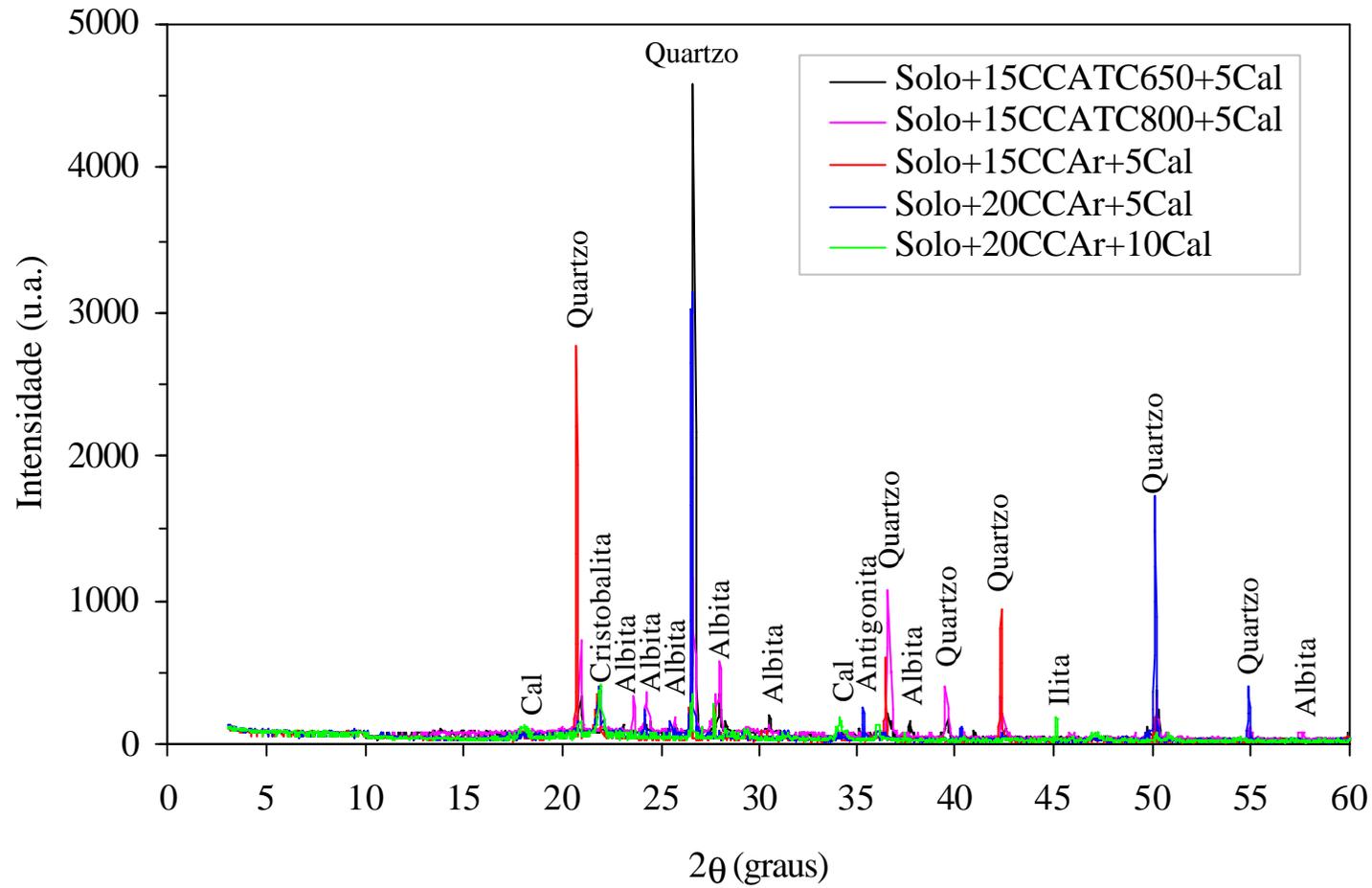


Figura 5. 10 - Difratoqramas de raios-X de todas as misturas solo-CCA-cal.

Uma análise comparativa das reações pozolânicas entre a cal e as cinzas produzidas a temperatura controlada de 650°C e 800°C e a cinza residual para as três combinações de teores cinza-cal é realizada na Figura 5.10. As dificuldades apresentadas na identificação de produtos cimentantes nas misturas solo-CCAr-cal com 28 dias de cura, ao contrário do acontecido com as misturas solo-CCA<sub>TC</sub>-cal para o mesmo tempo de cura, indicam que as quantidades de produtos cimentantes produzidos durante as reações pozolânicas são bem maiores nas misturas com cinza de casca de arroz queimadas a temperatura controlada do que nas misturas com cinza residual. A atividade pozolânica das cinzas de casca de arroz produzidas com controle de temperatura é muito maior que a das cinzas de casca de arroz residuais produzidas sem esse controle, especialmente na faixa de temperaturas controladas 650 – 800°C.

O difratograma de raios-X da mistura 20CCAr+5Cal, é dentre os difratogramas das misturas com cinzas residuais, o mais semelhante aos difratogramas das misturas solo-CCA<sub>TC</sub>-cal. É o que apresenta um maior e mais claro desenvolvimento de produtos cimentantes aos 28 dias de cura, porém há diferenças no tipo de produto pozolânico produzido pelas reações (antigorita na mistura com CCAr e albita na mistura com CCA<sub>TC</sub>). O consumo de CCA para atingir-se reações semelhantes é menor naquelas produzidas a temperatura controlada que nas residuais. A utilização de CCA incinerada a temperatura controlada entre 650°C e 800°C é mais eficiente e econômica para a estabilização de solos.

### 5.3 COMPORTAMENTO TENSÃO – DEFORMAÇÃO

A análise do comportamento tensão-deformação das misturas solo-CCA<sub>TC</sub>-cal foi realizada a partir dos resultados de ensaios de resistência à compressão simples.

Na Figura 5.11 apresentam-se as curvas tensão-deformação das misturas de solo estabilizado com 5% de cal e 15% de CCA incinerada a temperaturas controladas de 650°C e 800°C (15CCATC650+5Cal e 15CCATC800+5Cal) e solo-CCAr-cal, ensaiadas a resistência à compressão simples após 28 dias de cura. Para cada mistura foram ensaiados 3 corpos-de-prova, mas, por simplicidade, são representadas as curva tensão-deformação mais representativas de cada condição.

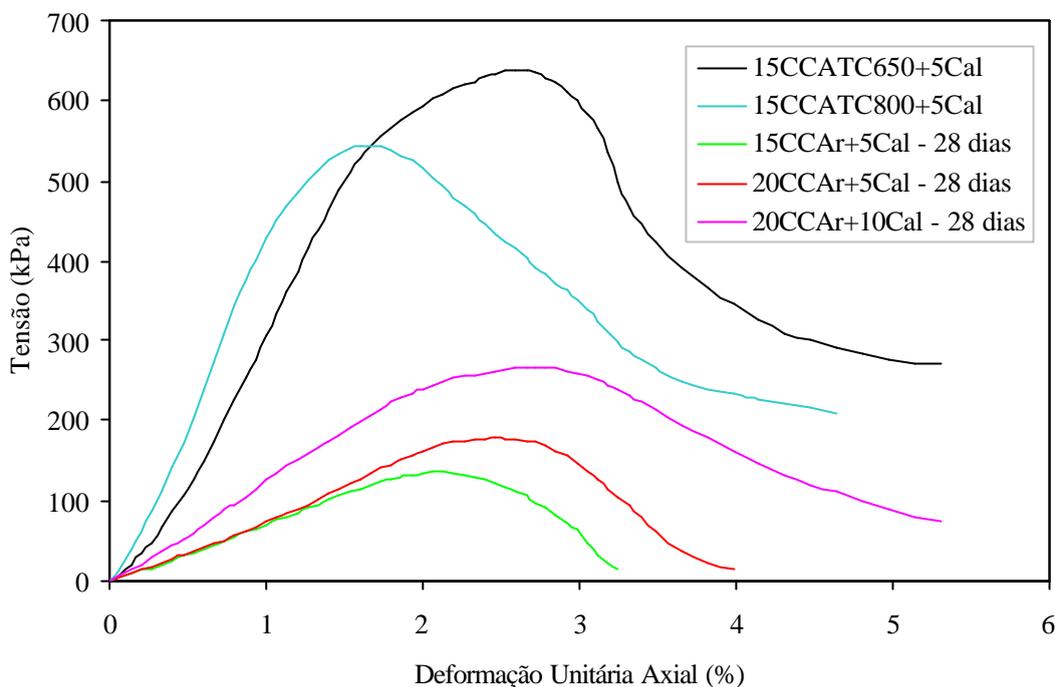


Figura 5. 11 - Curvas tensão-deformação das misturas solo- $CCA_{TC}$ -cal e solo- $CCAr$ -cal ensaiadas a compressão simples após de 28 dias de cura.

Para o mesmo tempo de cura, as misturas solo- $CCA_{TC}$ -cal apresentam comportamento tensão-deformação muito mais rígido e resistente, em comparação com as três misturas de solo- $CCAr$ -cal. Para a mistura  $15CCA_{TC650}+5Cal$  a deformação unitária axial de ruptura ( $\epsilon_r$ ) é praticamente de 3%, muito próxima à  $\epsilon_r$  da mistura com 20% de  $CCAr$  e 10% de cal. A  $\epsilon_r$  da mistura  $15CCA_{TC800}+5Cal$  foi de 1,5%, menor que a mesma deformação para a outra mistura com  $CCA_{TC650}$ .

A Figura 5.11 mostra que as resistências residuais das amostras com  $CCA_{TC}$  são bem elevadas, superando as resistências de pico das misturas com  $CCAr$ . Isto significa que, mesmo após a ruptura por trincamento, a camada de solo- $CCA$ -cal apresentará resistência satisfatória.

A ruptura de tipo frágil das misturas solo- $CCA_{TC}$ -cal no ensaio de resistência à compressão simples, pode-se observar na Figura 5.12.



Figura 5. 12 – Ruptura frágil do corpo-de-prova da mistura solo-15% CCA<sub>TC650</sub>-5% Cal submetido à compressão simples.

Os valores médios dos módulos de deformabilidade secante entre a origem e  $0,75\sigma_{rup}$  das misturas solo-CCA<sub>TC</sub>-cal, obtidos no ensaio de resistência à compressão simples após 28 dias de cura, das misturas solo-CCAr-cal para 28 e 56 dias de cura e do solo são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5. 3 – Valores de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  do solo natural, das misturas solo-CCAr-cal para 28 e 56 dias de cura e das misturas solo-CCA<sub>TC</sub>-cal para 28 dias de cura.

TEOR DE CINZA (%)	TIPO DE CINZA	TEOR DE CAL (%)	TEMPO DE CURA (dias)	MÓDULO SECANTE (MPa)
Solo				2,1
15	TC650	5	28	37,5
15	TC800	5	28	41,1
15	Residual	5	28	5,5
20	Residual	5	28	5,6
20	Residual	10	28	12,4
15	Residual	5	56	6,1
20	Residual	5	56	6,8
20	Residual	10	56	13,3

Os valores de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  para as misturas de solo-15%CCA<sub>TC</sub>-5%Cal são muito similares entre si e, na média, 18,7 vezes maiores que o valor de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  do solo natural. Para o mesmo tempo de cura, o módulo secante médio das misturas com CCA<sub>TC</sub> é 7,1 vezes e 3,2 vezes maior que os das misturas com iguais teores de CCAr e cal e com 20% de CCAr e 10% de cal respectivamente.

Quando são comparadas as misturas com CCA<sub>TC</sub> com as misturas com 15% de CCAr e 5% de cal e com 20% de CCAr e 10% de cal, curadas por 56 dias, verifica-se que os aumentos modulares foram de 6,5 e 3 vezes respectivamente. Portanto, as misturas produzidas com CCA<sub>TC</sub> atingem, já aos 28 dias, um módulo bem maior que os das misturas produzidas com CCAr, porém com 56 dias de cura.

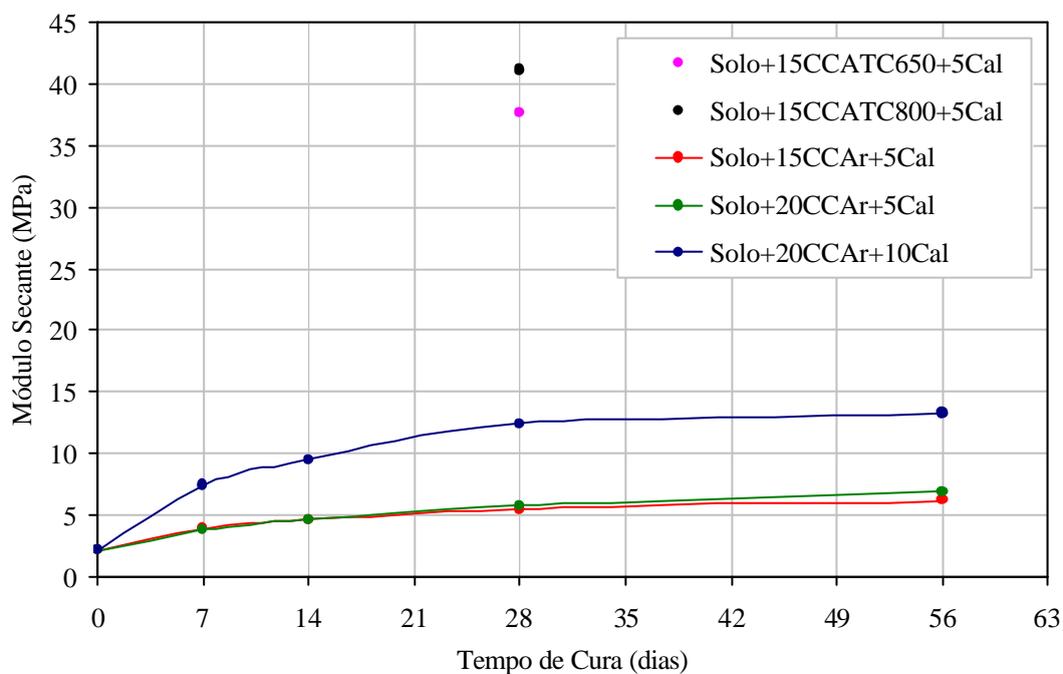


Figura 5. 13 – Módulos secantes em função do tipo de CCA, do tempo de cura e dos teores de CCA e cal.

As mesmas conclusões podem ser tiradas da Figura 5.13, onde são representados os valores do módulo secante ( $E_{0,75\sigma_{rup}}$ ) em função do tempo de cura de todas as misturas solo-CCA-cal. A maior atividade pozolânica das CCA<sub>TC</sub> respeito à da CCAr conduz a maiores e mais rápidos aumentos dos módulos, sendo os valores atingidos aos

28 dias de cura quase independentes da temperatura de incineração na faixa entre 650°C e 800°C.

#### 5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Figura 5.14 mostra três corpos-de-prova ensaiados à compressão simples, cujas cores são dadas pelas CCA: preta na cinza residual e branca cinza e branca cor-de-rosa nas cinzas incineradas a temperaturas de 650°C e 800°C, respectivamente. Os corpos-de-prova das misturas com cinzas incineradas a temperatura controlada apresentaram um aspecto mais sólido e denso, sem desagregações, conseqüência da maior atividade pozolânica ocorrida.



Figura 5. 14 – Corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão simples. Esquerda: mistura solo-CCAr-cal. Centro: mistura solo-CCA<sub>TC650</sub>-cal. Direita: mistura solo-CCA<sub>TC800</sub>-cal.

Os valores médios das resistências à compressão simples (RCS) das misturas de solo estabilizadas com 5% de cal e com 15% de CCA produzidas por incineração de casca de arroz a temperaturas de 650°C (CCA<sub>TC650</sub>) e 800°C (CCA<sub>TC800</sub>) após 28 dias de cura são mostrados na Tabela 5.4. Para efeito comparativo, inclui-se na Tabela o valor médio de RCS da mistura solo, 15% de CCAr e 5% de cal ensaiada após 28 dias de

cura. A Figura 5.15 representa graficamente os resultados da Tabela 5.4, mostrando também o comportamento da RCS das diferentes misturas do solo com CCAr e cal em função do tempo de cura.

Tabela 5. 4 – Valores médios de RCS do solo estabilizado com cal e CCA incineradas a temperaturas controladas após 28 dias de cura.

MISTURA	RCS (kPa)
Solo-15%CCAr-10%Cal	117,7
Solo-15%CCA <sub>TC650</sub> -10%Cal	569,6
Solo-15%CCA <sub>TC800</sub> -10%Cal	504,3

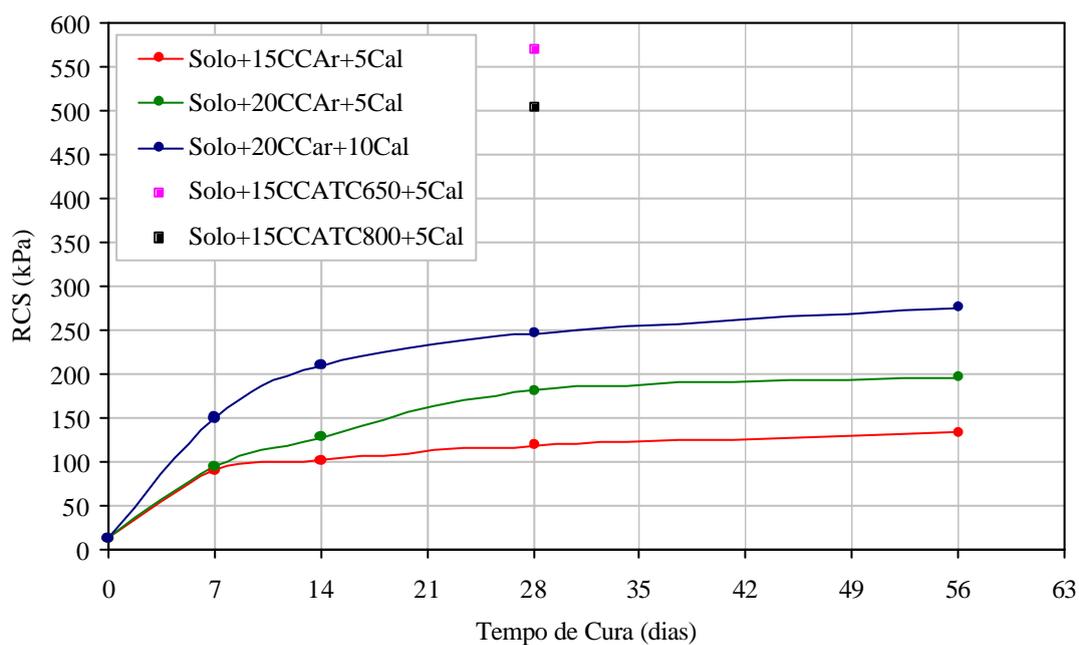


Figura 5. 15 - RCS em função do tipo de CCA, tempo de cura e teores de CCA e cal.

Destaca-se o notável incremento de RCS das misturas ensaiadas com CCA<sub>TC</sub>, com relação às misturas com CCAr. Para iguais teores de CCA e cal (15% e 5%) e mesmo tempo de cura (28 dias) o aumento de RCS é de 4,8 vezes para a mistura com

CCA<sub>TC650</sub> e de 4,3 vezes para a mistura com CCA<sub>TC800</sub>. Com respeito à mistura com 20% de CCAr e 10% de cal ensaiadas após 28 dias de cura (que foi a que apresentou máximas RCS), os valores de RCS das misturas com CCA<sub>TC650</sub> e CCA<sub>TC800</sub> foram 2,3 e 2 vezes maiores. Tomando como referência os valores de RCS da mesma mistura solo-20%CCAr-10%Cal, mas para 56 dias de cura, as RCS das misturas com CCA<sub>TC650</sub> e CCA<sub>TC800</sub> após 28 dias de cura são 2,1 e 1,8 vezes maiores.

A maior atividade pozolânica das CCA incineradas a temperatura controlada na faixa de 650 a 800°C traz como consequência o aumento das RCS dos solos estabilizados com estas cinzas e cal. Além, as taxas de ganho de resistência são maiores quando cinzas incineradas a temperatura controlada são empregadas na estabilização, sendo de esperar RCS muito mais elevadas aos 56 dias e além.

Para atingir resistências maiores, foram necessários menores teores de cal e CCA, quando empregadas cinzas a temperatura controlada, sendo uma alternativa que implicaria menores custos construtivos, portanto mais econômica.

A RCS da mistura com 15% de CCA<sub>TC800</sub> e 5% de cal é ligeiramente inferior ao da mistura com 15% de CCA<sub>TC650</sub> e 5% de cal, porém, dentro da margem de erro dos ensaios. Os difratogramas de raios-X das cinzas incineradas às temperaturas de 650°C e 800°C, mostraram um padrão muito similar quanto a presença de sílica amorfa. Portanto, era de se esperar uma atividade pozolânica similar. Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples validam essa hipótese, concluindo-se que a RCS de misturas solo-CCA<sub>TC</sub>-cal curadas por 28 dias é independente da temperatura de incineração da casca de arroz na faixa controlada entre 650°C e 800°C.

## 5.5 RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E O MÓDULO DE DEFORMABILIDADE SECANTE

Do mesmo modo que foi determinada para as misturas com cinza de casca de arroz residual e cal, procurou-se uma relação entre a RCS e o módulo secante para todas as misturas solo-CCA-cal, incluindo aquelas com CCA<sub>TC</sub>. A Figura 5.16 mostra esta relação.

Observa-se que é possível generalizar uma relação linear entre o módulo de deformabilidade secante ( $E_{0,75\sigma_{rup}}$ ) e a resistência à compressão simples, expressa pelo modelo:

$$E_{0,75\sigma_{rup}} \text{ (MPa)} = 0,06 \text{ RCS (kPa)} ; \quad R^2 = 0,88 \quad (5.1)$$

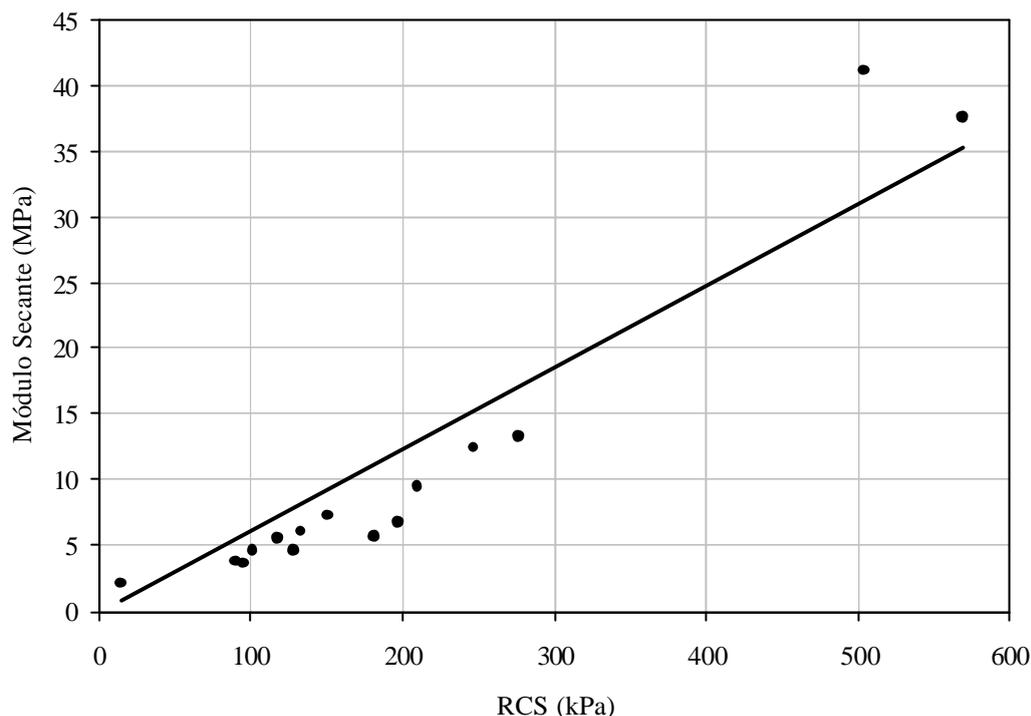


Figura 5. 16 - Relação entre o módulo de deformabilidade secante e a RCS para todas as mistura de solo com cal e CCA residual e incinerada a temperatura controlada.

Comparando com o modelo 4.18, obtido para as misturas solo-CCAr-cal, pode-se ver que existem diferenças quando se adiciona na análise os valores de  $E_{0,75\sigma_{rup}}$  e RCS das misturas solo-CCA<sub>TC</sub>-cal. Portanto, com o estado de avanço desta pesquisa não é possível obter um modelo geral que vincule o módulo de deformabilidade secante entre a origem e  $0,75\sigma_{rup}$  e a resistência à compressão simples que seja independente do tipo de CCA, dos teores de CCAr e cal e do tempo de cura. Para isso seria necessário uma maior quantidade de ensaios com mistura com CCA<sub>TC</sub> com diferentes temperaturas de incineração, teores e tempos de cura.

## 5.6 SÍNTEZE DO CAPÍTULO

Durante o processo de incineração da casca de arroz a temperaturas controladas na mufla, verificou-se que os pesos das cinzas de casca de arroz representam de 15 a 20% do peso da casca, confirmando as observações feitas por Juliano (1985). Isto deve-se à volatilização da celulose, da lignina, da água da casca. As perdas em peso da casca tendem a diminuir quando a temperatura de incineração aumenta até 650°C, estabilizando-se além dessa temperatura.

A temperatura limite máxima de incineração controlada para produzir cinzas de casca de arroz compostas de sílica amorfa seria 800°C para um tempo de queima de 4 h. Temperaturas superiores a 800°C produziriam cinzas de casca de arroz com sílica cristalina, portanto, de menor atividade pozolânica. Os resultados vão ao encontro do assinalado por Boateng e Skeete (1990).

A quantidade de matéria orgânica nas cinzas de casca de arroz, diminuiu com o aumento da temperatura de incineração controlada, sendo elevada para os propósitos de estabilização para temperaturas até de 650°C. Para evitar os efeitos da matéria orgânica sobre a atividade pozolânica seria recomendável queimar a casca de arroz a temperaturas superiores aos 650°C.

Para as cinzas pesquisadas a faixa ótima de temperaturas de incineração situa-se entre 650 e 800°C. Esta faixa permitiria produzir, de forma controlada, cinzas com teores desprezíveis de matéria orgânica ou carvão e com estruturas amorfas, portanto, cinzas com a máxima reatividade pozolânica possível.

As misturas de solo com  $CCA_{TC}$  e cal, curadas durante 28 dias, apresentaram formação de produtos cimentantes, para o caso albita, demonstrando que existem reações entre a sílica amorfa da cinza e os íons  $Ca^{++}$  da cal.

As misturas com  $CCA_{TC650}$  e  $CCA_{TC800}$ , não mostraram grandes diferenças na mineralogia das misturas. A atividade pozolânica das CCA é independente das temperaturas de incineração controlada na faixa entre 650°C e 800°C.

Para um mesmo tempo de cura, as quantidades de produtos cimentantes produzidos durante as reações pozolânicas foram bem maiores nas misturas com  $CCA_{TC}$

do que nas misturas com CCAr, confirmando que a atividade pozolânica das CCA<sub>TC</sub> é muito maior que a das CCA produzidas sem controle de temperatura, especialmente na faixa de temperaturas controladas 650 – 800°C.

Como para atingir reações semelhantes foram necessários menores teores de CCA<sub>TC</sub> e cal que de CCAr e cal, a utilização de CCA incinerada a temperatura controlada entre 650°C e 800°C é mais eficiente e econômica para a estabilização de solos.

Para o mesmo tempo de cura, as misturas de solo com CCA<sub>TC</sub> e cal apresentam comportamento tensão-deformação muito mais rígido e resistente, em comparação com as de solo com CCAr e cal. Aliás, as resistências residuais das amostras com CCA<sub>TC</sub> foram bem elevadas, superando as resistências de pico das misturas com CCAr. Isto significa que, mesmo após a ruptura por trincamento, a camada de solo-CCA-cal apresentará resistência satisfatória.

Os módulos secantes das misturas de solo com CCA<sub>TC</sub> e cal com 28 dias de cura, foram 18,7 vezes maiores que o módulo do solo natural e maiores que os módulos secantes de todas as misturas de solo com CCAr e cal ensaiadas. A maior atividade pozolânica das CCA<sub>TC</sub> respeito à das CCAr conduz a maiores e mais rápidos aumentos dos módulos, sendo os valores atingidos aos 28 dias de cura quase independentes da temperatura de incineração na faixa entre 650°C e 800°C.

Observou-se um notável incremento de RCS das misturas ensaiadas com CCA<sub>TC</sub>, com relação às misturas com CCAr, devido à maior atividade pozolânica das CCA incineradas a temperatura controlada na faixa de 650 a 800°C. Além, as taxas de ganho de resistência foram maiores quando empregadas CCA<sub>TC</sub>. A estabilização de solos com CCA<sub>TC</sub> e cal é uma alternativa mais econômica, já que para atingir resistências maiores são necessários menores teores de CCA<sub>TC</sub> e cal que de CCAr e cal.

A RCS da mistura com CCA<sub>TC800</sub> foi ligeiramente inferior ao da com CCA<sub>TC650</sub>, porém, dentro da margem de erro dos ensaios. As temperaturas de incineração da casca próximas ao limite inferior da faixa (650°C) dariam melhores resultados. Isto é de grande importância, toda vez que a produção de cinzas de casca de arroz com a maior atividade pozolânica implicaria menores custos em termos energéticos.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de laboratório e as análises realizadas nos Capítulos 3, 4 e 5 permitem resumir as seguintes conclusões.

#### 6.1.1 Com relação aos materiais empregados

- O solo utilizado nesta pesquisa é uma areia bem graduada com silte, classificada como SW-SM segundo o sistema unificado de classificação de solos da ASTM, e como A-1-b (0) segundo o sistema AASHTO. Sua mineralogia é composta principalmente de quartzo, com uma fração fina com montmorilonita e caolinita. É um solo que apresenta dificuldades à compactação dinâmica, com curvas de compactação muito achatadas, sem pico. A capacidade suporte é baixa (ISC entre 5% e 9%), não sendo adequado para camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários.

- Foi utilizada na pesquisa uma cinza de casca de arroz residual gerada no processo de parboilização do arroz, no qual a casca de arroz é queimada em um forno a temperaturas elevadas sem controle. A cinza coletada apresentou uma cor preta, classificando como uma cinza com elevado teor de carvão. A densidade real dos grão da CCAr é de 1,81, sendo o teor de matéria orgânica elevado (19%). Mineralógicamente é constituída principalmente de cristobalita (sílica cristalina) e, secundariamente de carvão. Portanto, é uma cinza de relativa baixa atividade pozolânica.

#### 6.1.2 Com relação às mineralogia e propriedades mecânicas das misturas com cinza de casca de arroz residual

- Difractogramas de raios-X realizados nas misturas solo, cinza de casca de arroz residual e cal, com 28 dias de cura, evidenciaram a ocorrência de reações

pozolânicas com formação de produtos cimentantes, como a antigorita. As dificuldades na identificação dos produtos cimentantes nos difratogramas de raios-X das misturas, após 28 dias de cura, indicariam a pequena quantidade dos mesmos, devido à baixa atividade pozolânica da cinza de casca de arroz residual. As reações pozolânicas acontecem entre a cal e a cinza amorfa, o que ficou demonstrado com a permanência do quartzo do solo e da cristobalita da cinza.

- A curva de compactação da mistura solo, 20% de cinza de casca de arroz residual e 10% de cal, na energia Normal, também não apresentou pico, sendo muito similar à do solo natural.

- As características de compactação da mistura de solo com 20% de cinza de casca de arroz residual e 10% de cal seguiram o padrão usual na estabilização alcalina. O peso específico seco máximo diminuiu fortemente e o teor ótimo de umidade aumentou, devido às características porosas da cinza de casca de arroz e pelo consumo de água pela cal na hidratação.

- Ao realizar-se ensaios de Índice Suporte de Califórnia (ISC) na mistura de solo, 20% de cinza de casca de arroz residual e 10% de cal, curada por 28 dias, constatou-se que a capacidade suporte aumentou significativamente, alcançando o valor ISC igual a 25%.

- As misturas solo-cinza de casca de arroz residual-cal apresentaram no ensaio de resistência à compressão simples ruptura frágil e um comportamento tensão-deformação mais rígido do que o solo natural. A fragilidade das misturas e o módulo de deformabilidade secante aumentaram com o tempo de cura.

- Os módulos de deformabilidade secante das misturas de solo com 15% de cinza de casca de arroz residual e 5% de cal, e com 20% de cinza de casca de arroz residual e 5% de cal, aumentaram rapidamente, atingindo valores máximos de 5,5 Mpa aos 28 dias de cura, mas sem ganhos adicionais ao aumentar-se o tempo de cura para 56 dias. A mistura com 20% de cinza de casca de arroz residual e 10% de cal, também apresentou aumentos rápidos de módulo secante, porém após dos 14 dias de cura produziram-se ganhos modulares mais significativos, alcançando-se 13 Mpa aos 56 dias de cura. Isto foi atribuído à disponibilidade de cal sem reagir na mistura, o que permitiu o contínuo desenvolvimento de novas reações pozolânicas.

- O aumento do módulo secante ao estabilizar-se o solo com cinza de casca de arroz residual e cal, para todos os tipos de mistura considerados, demonstra a existência de reações pozolânicas entre a sílica amorfa da cinza e a cal, para todos os teores utilizados. Não houve influência do teor de cinza de casca de arroz residual de (15% para 20%) no módulo das misturas, quando o teor de cal adicionado foi 5%, uma vez que não foram observadas modificações notáveis nos valores do módulo secante. Já ao acrescentar-se 20% de cinza de casca de arroz residual, o aumento de teor de cal de 5% para 10% produziu maiores aumentos nos valores do módulo secante.

- O módulo de deformabilidade secante aumentou quando a demora entre a mistura e a compactação foi de 1 hora. Para tempos de espera superiores (2 a 4 h) observou-se uma acentuada redução do módulo de deformabilidade.

- A resistência à compressão simples das misturas aumentou com os teores de cinza de casca de arroz residual e cal e com os tempos de cura, atingindo um valor máximo de 276 kPa para a mistura solo, 20% de cinza de casca de arroz residual e 10% de cal. A resistência à compressão simples dessa mistura, aos 28 e 56 dias de cura, foi, respectivamente, 18 e 20 vezes que a do solo natural. O aumento do teor de cinza de casca de arroz residual proporciona um maior teor de sílica amorfa, favorecendo as reações pozolânicas com a cal. O acréscimo do teor de cal aumenta consideravelmente a resistência à compressão simples e acelera as reações pozolânicas com a sílica amorfa da cinza, atingindo-se maiores taxas de crescimento de resistência à compressão simples nas idades prematuras. Não se identificaram teores ótimos de cinza de casca de arroz residual e cal.

- A resistência à compressão simples das misturas solo-cinza de casca de arroz residual-cal, com 28 dias de cura, diminuiu sensivelmente apenas quando o tempo de espera entre a mistura e a compactação foi de 4 h. As reações rápidas, como a floculação e a aglomeração, teriam prejudicado a compactação das misturas, causando a diminuição no ganho de resistência. Tempos de espera de até 3 h, entre a mistura e a compactação, não afetaram a resistência à compressão simples.

- Determinou-se uma relação linear entre o módulo de deformabilidade secante e a resistência à compressão simples das misturas solo-cinza de casca de arroz

residual-cal, independentemente dos teores de cinza de casca de arroz residual e cal e do tempo de cura.

- Observou-se desenvolvimento de resistência à tração por compressão diametral em todas as misturas, indicando a ocorrência de cimentação pozolânica, devida às reações entre a sílica amorfa da cinza e a cal. A máxima resistência à tração por compressão diametral foi de 95 kPa para a mistura de solo com 20% de cinza de casca de arroz residual e 10% de cal, com 56 dias de cura. Para todas as misturas o aumento de resistência à tração por compressão diametral foi rápido, diminuindo a taxa de crescimento com o tempo de cura.

- Contrariamente ao esperado, a resistência à tração por compressão diametral da mistura de solo com 15% de cinza de casca de arroz residual e 5% de cal foi superior à da mistura solo, 20% de cinza de casca de arroz residual e 5% de cal. Isto pode ser atribuído ao fato de que os pesos específicos secos dos corpos-de-prova das misturas com 15% de cinza foram maiores que os correspondentes às outras misturas.

- Foi determinado um quociente RCD/RCS de 0,29 para as misturas solo-cinza de casca de arroz residual-cal ( $r^2 = 0,90$ ).

- Nos ensaios de durabilidade, nenhuma das misturas atingiu o quociente de resistência mínimo admissível de 80%, sugerido por Marcon (1977) para solos estabilizados com cal. O quociente mais elevado foi de 77% para a mistura com 20% de cinza de casca de arroz residual e 10% de cal. Contudo, a resistência à compressão simples da mistura com 20% de cinza de casca de arroz residual e 10% de cal, submetida a 12 ciclos de molhagem e secagem, foi superior às resistências das misturas com 15% de cinza e 5% de cal e com 20% de cinza e 5% de cal, não submetidas a ciclos. Levando em conta que os quocientes de resistência obtidos na pesquisa foram maiores que os relatados na literatura internacional, e considerando a baixa atividade pozolânica da cinza de casca de arroz residual utilizada na pesquisa, podem-se considerar como aceitáveis os quocientes obtidos para as misturas com 20% de cinza de casca de arroz residual e 5% de cal e com 20% de cinza e 10% de cal, especialmente para esta última, particularmente visando a utilização da estabilização do solo com cinza de casca de arroz residual e cal em pavimentos de baixo a médio volume de tráfego.

### 6.1.3 Com relação à mineralogia e propriedades mecânicas das misturas com cinza de casca de arroz incinerada a temperatura controlada

- Cascas de arroz coletadas no mesmo sítio que a cinza de casca de arroz residual foram incineradas a temperaturas controladas em laboratório. Observou-se que a temperatura de incineração da casca de arroz influi na estrutura mineralógica das cinzas produzidas, obtendo-se cinzas amorfas para temperaturas entre os 500°C e os 800°C para um tempo de incineração de 4 h. Teores desprezíveis de matéria orgânica ou carvão foram observados para temperaturas de incineração a partir dos 650°C. Portanto, para as cinzas pesquisadas a faixa de temperaturas de incineração ótima, aos efeitos de estabilização de solos, é de 650 a 800°C. Esta faixa permitiria produzir, de forma controlada, cinzas com teores e com estruturas amorfas, portanto, cinzas com a máxima reatividade pozolânica possível.

- Difractogramas de raios-X das misturas com 15% de cinza de casca de arroz incinerada a temperatura controlada de 650°C e 5% de cal e com 15% de cinza de casca de arroz incinerada a temperatura controlada de 800°C e 5% de cal, com 28 dias de cura, mostraram mineralogias muito similares, composta de albita e quartzo. Portanto, a atividade pozolânica das cinzas de casca de arroz é independente das temperaturas de incineração controlada, na faixa entre 650°C e 800°C. A maior facilidade na identificação de produtos cimentantes nos difractogramas de raios-X, ao contrário do acontecido com as misturas com cinza de casca de arroz residual, indica produção de maior quantidade destes produtos. A atividade pozolânica das cinzas de casca de arroz produzidas a temperatura controlada, na faixa de 650 – 800°C, é muito maior que a da cinza de casca de arroz residual.

- Os módulos de deformabilidade secante das misturas com cinza de casca de arroz a temperatura controlada e cal foram praticamente iguais, sendo em média de 39 MPa. Quando são comparados com os resultados obtidos nas misturas com cinza de casca de arroz residual e cal, inclusive àquelas ensaiadas após de 56 dias de cura, verifica-se que os ganhos de rigidez foram várias vezes maiores. A maior atividade pozolânica das cinzas de casca de arroz a temperatura controlada conduz a maiores e mais rápidos aumentos modulares, sendo os valores atingidos aos 28 dias de cura

praticamente independentes da temperatura de incineração na faixa entre 650°C e 800°C.

- As resistências à compressão simples das misturas de solo-cinza de casca de arroz a temperatura controlada-cal foram similares, na média de 537 kPa. A atividade pozolânica das cinzas produzidas por incineração controlada entre 650°C e 800°C é similar, não afetando a resistência das misturas solo-cinza-cal, curadas por 28 dias.

- A resistência residual (pós-pico) das misturas produzidas com cinza de casca de arroz incinerada a temperatura controlada mantém valores aceitáveis (próximos a 200 kPa), inclusive superiores às resistências de pico das misturas com cinza de casca de arroz residual. Isto indica que, mesmo depois de trincada, a camada de solo estabilizado com cinza produzida a temperatura controlada e cal, apresentariam valores aceitáveis de resistências.

- A resistência à compressão simples média das misturas com cinza de casca de arroz incinerada a temperatura controlada (650°C e 800°C) e cal, com 28 dias de cura (537 kPa), foi muito superior à resistência da misturas com cinza de casca de arroz residual e cal, com 56 dias de cura (276 kPa). A maior atividade pozolânica das cinzas de casca de arroz a temperatura controlada na faixa de 650 a 800°C causa o aumento dos valores de resistência à compressão simples e das taxas de ganho de resistência. Maiores resistências à compressão simples foram obtidas com menores teores de cal e cinza de casca de arroz a temperatura controlada. Portanto, o uso de cinza de casca de arroz a temperatura controlada na faixa de 650 a 800°C é uma alternativa que implicaria menores custos construtivos.

#### 6.1.4 Conclusão global

- Constatou-se que a cinza de casca de arroz residual empregada na pesquisa possibilita, em conjunto com a cal, a produção de um material significativamente mais resistente e durável e menos deformável que o solo natural, constituindo-se, portanto, em alternativamente tecnicamente viável e ambientalmente correta para pavimentação de rodovias em regiões orizícolas.

- O controle da temperatura de queima da casca de arroz conduz à produção de uma cinza mais reativa que a residual, proporcionando aumentos significativos de resistência e de módulo de deformabilidade. A faixa adequada é de 650 a 800°C. Como dentro dessa faixa as cinzas produzidas apresentam atividade pozolânica semelhante, sugere-se que a queima seja feita a temperaturas ligeiramente superiores a 650°C, o que representaria vantagens econômicas e ambientais, decorrentes do menor consumo energético.

Finalizando, salienta-se que o emprego de cinza de casca de arroz, junto à cal, na estabilização de solos arenosos, propiciará significativa melhoria na malha viárias de regiões produtoras de arroz, com reflexos sócio-econômicos. Igualmente contribuirá para a preservação do meio ambiente, empregando um resíduo abundante e reduzindo-se a exploração de jazidas de recursos não-renováveis, como solos e rochas.

## 6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com a finalidade de complementar e ampliar os conhecimentos adquiridos nesta dissertação, sugere-se:

- Analisar cinzas de casca de arroz incineradas a temperatura controlada com métodos diferentes ao utilizado na pesquisa e variando os tempos de incineração para avaliar os efeitos destes fatores de incineração no tipo de cinza produzida.
- Realizar difratogramas de raios-X e ensaios de composição química em misturas de solo com cinza de casca de arroz e cal, com tempos de cura maiores de 28 dias, por exemplo, 56 e 90 dias. Deste modo poderia verificar-se a formação e a evolução de produtos cimentantes.
- Realizar ensaios de resistência à compressão simples de misturas com teores de cinza de casca de arroz residual e cal diferentes aos empregados na pesquisa, visando a verificar a existência de teores ótimos, além dos quais a resistência à compressão simples diminui.

- Realizar ensaios de difratograma de raios-X e de resistência em misturas com cinza de casca de arroz incinerada a temperaturas controladas inferiores a 650°C, de modo de analisar a influência do teor de matéria orgânica na atividade pozolânica das cinzas e visando o ajuste do limite inferior de temperatura de incineração.
- Realizar ensaios de resistência à compressão simples, de resistência à tração por compressão diametral e de durabilidade em misturas com cinzas de casca de arroz produzidas a temperatura controlada, utilizando os mesmos teores empregados na pesquisa e outros teores diferentes e com tempos de cura para os ensaios de resistência diferentes ao utilizado na pesquisa. Para produzir os volumes necessários, seria recomendável construir fornos ou muflas de laboratório especiais.
- Realizar ensaios triaxiais de carga repetida no solo e ensaios de resistência à tração indireta por carregamento repetido e de fadiga em misturas de solo-cinza de casca de arroz-cal, utilizando diferentes teores e tipos de cinza de casca de arroz (residual e produzidas com diversas temperaturas controladas) e cal e diferentes tempos de cura.
- Executar trechos experimentais instrumentados, para avaliação do desempenho de pavimentos com camadas de solo estabilizadas com cinza de casca de arroz e cal.
- Avaliar o desempenho de pavimentos executados com camadas de solo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal. Comparar medições de deformações de pavimentos no campo com os valores previstos através de modelos numéricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, F. H.; ADNAN, A.; CHOY, C. K. **Geotechnical Properties of a Chemically Stabilized Soil from Malaysia with Rice Husk Ash as an Additive.** Geotechnical and Geological Engineering, v. 10, n. 2, pp. 117 – 134, Amsterdam, 1992.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Part II: Methods of Sampling and Testing.** 14<sup>th</sup> Ed., AASHTO Publication, Washington, D.C., 1986.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Annual Book of ASTM Standards.** Philadelphia, 1998.
- ARABANI, M.; VEIS KARAMI, M. **Geomechanical Properties of Lime Stabilized Clayey Sands.** In: 2<sup>nd</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TREATMENT AND RECYCLING OF MATERIALS FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE, disponível em CD, 10 p., Paris, 2005.
- ASOCIACIÓN DE CULTIVADORES DE ARROZ (ACA). **Evolución del cultivo de Arroz en Uruguay.** <Disponível em: [www.aca.com.uy/datos\\_estadisticos/evolucion\\_cultivo.htm](http://www.aca.com.uy/datos_estadisticos/evolucion_cultivo.htm)>, 2006.
- BASHA, E. A.; HASHIM, R.; MAHMUD, H. B.; MUNTOHAR, A. S. **Stabilization of Residual Soil with Rice Husk Ash and Cement.** Construction and Building Materials, Ed. Elsevier, v. 19, pp. 448 – 453, 2005.
- BASHA, E. A.; HASHIM, R.; MUNTOHAR, A. S. **Effect of Cement - Rice Husk Ash on the Plasticity and Compaction of Soil.** Electronic Journal of Geotechnical Engineering. <Disponível em: [www.ejge.com/2003/Ppr0304/Ppr0304.htm](http://www.ejge.com/2003/Ppr0304/Ppr0304.htm)>. Publicado no site em 2003. 11 p., 2003.
- BASMA, A. A.; TUNCER, E. R. **Effect of Lime on Volume Change and Compressibility of Expansive Clays.** Transportation Research Record, n. 1295, p. 52-61, Washington D.C., 1991.

- BEHAK, L. **Metodologías de Utilización de los Materiales Basálticos del Descompuesto y Desagregado de la Formación Arapey en Pavimentos Económicos.** In: 3er. CONGRESO DE LA VIALIDAD URUGUAYA, disponível em CD, 12 p., Montevideo, 2001.
- BELL, F. G. **Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils.** Engineering Geology, n. 42, pp. 223-237, 1996.
- BOLLENS, Q.; VERBRUGGE, J.C. **Time Dependant Evolution of the Shear Strength of a Silty Soil Treated with Lime.** In: 2<sup>nd</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TREATMENT AND RECYCLING OF MATERIALS FOR TRANSPORT INFRAESTRUCTURE, disponível em CD, 9 p., Paris, 2005.
- BRANDL, H. **Alteration of Soil Parameters by Stabilization with Lime.** In: 10<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, v. 1, pp. 587-594, Stockholm, 1981.
- 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 No. 2066, Portland Cement Association, 60 p., Skokie, Illinois, USA, 2003.
- BOATENG, A. A.; SKEETE, D. A. **Incineration of Rice Hull for Uses as a Cementitious Material. The Guyana Experience.** Cement and Concrete Research; v. 20, n. 5, pp. 795 – 802, USA, 1990.
- CASANOVA, F. J. O. C. **Um Estudo Físico-químico-matemático da Estabilização Alcalina de Solos Argilosos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – UFRJ, Rio de Janeiro, 1981.
- CASTRO, E.; LUIS, A. S. **O Solo-Cal na Pavimentação de Estradas e Aeródromos.** Geotecnia, n. 10, pp. 29-59, Lisboa, 1974.
- CERATTI, J. A. P. **Efeitos da Adição de Cal e Cinza Volante nas Propriedades de um Solo Residual Compactado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1979.
- CHAUVEL, A.; NÓBREGA, 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 No. 12, São Paulo: ABPC, pp. 124-172, 1980.
- CLARE, K. E.; CRUCHLEY, A. E. **Laboratory Experiments in the Stabilization of Clays with Hydrated Lime.** Géotechnique, n. 7, pp. 97-111, London, 1957.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 138/94: Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral.** Rio de Janeiro, 1994.
- DURÁN, A.; CALITRA, A.; MOLFINO, J. H. **Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay.** Facultad de Agronomía, Universidad de la República, 2001
- EADES, J. L. **Reactions of Ca(OH)<sub>2</sub> with Clay Minerals in Soil Stabilization.** University of Illinois, Urbana, 1962.
- EPPS, J. A.; DUNLAP, W. A.; GALLAWAY, B. M. **Soil Stabilization: A Mission Oriented Approach.** Highway Research Record, n. 351, pp. 1-20, Washington, D.C., 1971.
- FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. **Glossário de Termos e Expressões em Ciências do Solo.** Publicação No. 138 (UFV), Vicosa, 1982.
- GRIM, R. E. **Applied Clay Mineralogy.** McGraw – Hill Book Company, Inc., New York, 1962.
- GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2ª Ed. São Paulo: PINI, 2002.
- GUIMARÃES, J. E. P. **Estabilização de Solos – Nova e Importante Aplicação da Cal – Seus Conceitos e suas Vantagens.** Boletim No. 1, São Paulo: ABPC, 1971.
- HARTY, J. R.; THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Tropical and Subtropical Soils.** Highway Research Record, n. 442, pp. 102-112, Washington, D.C., 1973.
- HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Lime-Soil Mixtures.** Highway Research Board Bulletin, n. 304, pp. 99-121, Washington, D.C., 1961.

- HERZOG, A.; MITCHELL, J. K. **Reactions Accompanying Stabilization of Clay with Cement.** Highway Research Record, n. 36, pp. 166-171, Washington, D.C., 1963.
- HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. **Lime Fixation in Clayey Soils.** Highway Research Record, n. 262, pp. 20-32, Washington, D.C., 1969.
- HOLT, C. C.; FREER-HEWISH, R. J.; GHATAORA, G. S. **The use of Lime-Treated British Clays in Pavement Construction. Part 2: The Effect of Mellowing on the Modification Process.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport, v. 141, pp. 207-216, 2000.
- 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, pp. 228-239, 1998.
- HOOVER, J. M.; HANDY, R. L.; DAVIDSON, D. T. **Durability of Soil-Lime-Fly Ash Mixtures Compacted above Standard Proctor Density.** Highway Research Board Bulletin, n. 139, pp. 1-11, Washington, D.C., 1958.
- HOSSAIN, A. S. M. M. **Cement and Cement-Rice Husk Ash and Stabilization of Selected Local Alluvial Soils.** Thesis (Master Science) – Department of Civil Engineering/Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka, 1986.
- HOUSTON, D. F. **Rice Hulls.** Rice Chemistry and Technology, American Association of Cereal Chemists, pp. 301-340, MN, 1972.
- HUNTER, D. **Lime-Induced Heave in Sulfate-Bearing Clay Soils.** Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, v. 114, n. 2, pp. 150-167, New York, 1988.
- INGLES, O. G. **Advances in Soil Stabilization 1961-67.** Reviews Pure and Applied Chemistry, n. 18, pp. 291-310, Melbourne, 1968.
- INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization. Principles and Practice.** Butterworths, Melbourne, 1972.

- JAMES, J.; RAO, S. M. **Reactivity of Rice Husks Ash**. Cement Concrete Research, n. 16, pp. 296-302, 1986.
- JOLY, C. ; LELONG, V. **Traitement des Matériaux de Scalpage a la Chaux**. In: 2<sup>nd</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TREATMENT AND RECYCLING OF MATERIALS FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE, disponível em CD, 11 p., Paris, 2005.
- JULIANO, B. O. **Rice: Chemistry and Technology**. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minneapolis, 1985.
- KAVAK, A.; KESKIN, E.; AKYARLI, A. **Lime Stabilization for Road Constructions: Recent Applications in Turkey**. In: 2<sup>nd</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TREATMENT AND RECYCLING OF MATERIALS FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE, disponível em CD, 10 p., Paris, 2005.
- KORISA, J. **Rice and Its By-products**. Edward Arnold, 2<sup>nd</sup> Ed., 426 p., London, 1958.
- LAMBE, T. W. **Soil Stabilization**. In: Foundation Engineering, Cap. 4, Editado por G. A. Leonards, Ed. Mc Graw – Hill Book Co., 1962.
- LAZARO, R. C.; MOH, Z. C. **Stabilization of Deltaic Clays with Lime-Rice Husk Ash Mixtures**. In: 2<sup>nd</sup> SOUTHEAST ASIAN CONFERENCE ON SOIL ENGINEERING, pp. 215-223, 1970.
- 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.
- LITTLE, D. N. **Assessment of In Situ Structural Properties of Lime-Stabilized Clay Subgrade**. Transportation Research Record, n. 1546, p. 13-23, Washington D.C., 1996.
- LOVATO, R. S. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, 144 p., Porto Alegre, 2004.

- LUCENA, A. L. P.; BRUGNARA, C. M. **Estabilização de Sub-bases e Subleitos com Emprego de Cal.** In: XI REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Campinas, 1970. **Anais...**
- MAERTENS, J.; VAN GEMERT, V.; TANNEKOON, J. ; VERHELST, F. **Influence of Water Saturation on the Geotechnical Behaviour of a Lime Treated Silt.** In: 2<sup>nd</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TREATMENT AND RECYCLING OF MATERIALS FOR TRANSPORT INFRAESTRUCTURE, disponível em CD, 8 p., Paris, 2005.
- MARCON, A. F. **Durabilidade e Módulo de Elasticidade de Misturas Areia-Cal-Cinza Volante.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1977.
- MATEOS, M. **Soil Lime Research at Iowa State University.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE, n. 90, pp. 127-153, New York, 1964.
- METHA, P. K. **The Chemistry and Technology of Cement Made from Rice Husk Ash.** Proc: UNIDO/ESCAP/RCTT WORKSHOP ON RICE HUSK ASH CEMENT, pp. 113-122, Peshawar, 1979.
- METHA, P. K.; HU, F. **Further Evidence for Expansion of Ettringite by Water Adsorption.** Journal of the American Ceramic Society – Discussions and Notes, pp. 179 - 180, 1978.
- METHA, P. K. **Rice Hull Ash Cement... High-Quality, Acid Resisting.** ACI Journal, pp. 235 – 236, USA, 1975.
- 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. **Practical Problems from Surprising Soils Behaviour.** Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, v. 112, n. 3, pp. 259 – 289, New York, 1986.

- MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R. **Influence of Time between Mixing and Compaction on Properties of a Lime-Stabilized Expansive Clay.** Highway Research Board Bulletin, n. 304, pp. 14 – 31, Washington D.C., 1961.
- MUNTOHAR, A. S.; HANTORO, G. **Influence of Rice Husk Ash and Lime on Engineering Properties of a Clayey Subgrade.** Electronic Journal of Geotechnical Engineering. <Disponível em: [www.ejge.com/2000/Ppr0019/Ppr0019.htm](http://www.ejge.com/2000/Ppr0019/Ppr0019.htm)>, Publicado no site em 2000, 12 p., 2000.
- NATIONAL INSTITUTE FOR TRANSPORTATION AND ROAD RESEARCH. **Cimentitious Stabilizers in Road Construction.** Technical Recommendations for Highways, v. 13, pp. 1 – 64, Pretoria, 1986.
- NATIONAL LIME ASSOCIATION (NLA). **Lime-Treated Soil Construction Manual. Lime Stabilization & Lime Modification.** NLA, Bulletin No. 326, 41 p., 2004.
- NEUBAUER, C. H.; THOMPSON, M. R. **Stability Properties of Uncured Lime-Treated Fine Grained Soils.** Highway Research Record, n. 281, Washington, D.C., 1972.
- NÚÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, 150 p., Porto Alegre, 1991.
- OSINUBI, K. J. **Influence of Compactive Efforts and Compaction Delays on Lime-Treated Soil.** Journal of Transportation Engineering, Março/Abril, 1998.
- PETRY, T. M.; GLAZIER, E. J. **The Effect of Organic Content on Lime Treatment of Highly Expansive Clay.** In: 2<sup>nd</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TREATMENT AND RECYCLING OF MATERIALS FOR TRANSPORT INFRAESTRUCTURE, disponível em CD, 15 p., Paris, 2005.
- PETRY, T. M.; LITTLE, D. N. **Update on Sulfate-Induced Heave in Treated Clays; Problematic Sulfate Levels.** Transportation Research Record, n. 1362, pp. 51 - 55, Washington, D.C., 1992.

- PETRY, T. M.; WOHLGEMUTH, S. K. **The Effects of Pulverization on the Strength and Durability of Highly Active Clay Soils Stabilized with Lime and Portland Cement.** Transportation Research Record, n. 1190, pp. 38-45, Washington D.C., 1988.
- PRECIOZZI, F; SPOTURNO, J; HEINZEN, W; ROSSI, P. **Memoria Explicativa de la Carta Geológica del Uruguay, a Escala 1:500.000.** DI.NA.MI.GE.(MIEM), 90 p., Montevideo, 1985.
- PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. **Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils.** Transportation Research Record, n. 1652, p. 215-227, Washington D.C., 1999.
- PUPPALA, A. J.; MOHAMAD, L. N.; ALLEN, A. **Engineering Behavior of Lime-Treated Louisiana Subgrade Soil.** Transportation Research Record, n. 1546, p. 24-31, Washington D.C., 1996.
- QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. **Soil Properties Affecting the Lime Stabilization of Red Tropical Soils from North East Brazil.** These (Doctorate) – University of Leeds, 344 p., Leeds, 1979.
- RAHMAN, M. A. **Effect of Cement Rice Husk Ash Mixtures on Geotechnical Properties of Lateritic Soils.** Journal Soil Foundation, n. 27 (2), pp. 61-65, 1987.
- RAHMAN, M. A. **The Potential of Some Stabilizers for the Use of Lateritic Soil in Construction.** Building and Environment Journal; v. 21, n. 1; pp. 57 – 61; England, 1986.
- RICO, A.; DEL CASTILLO, H. **La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropuertos.** Ed. Limusa, v 2, México D.F., 1993.
- RODRÍGUEZ, G. **Influencia de la Incorporación de Ceniza de Cáscara de Arroz Residual en Hormigones de Alto Desempeño y Convencionales.** In: XXX JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, Brasilia, 2002.
- RODRÍGUEZ, G. **Estudio Comparativo entre las Propiedades Mecánicas de Hormigones de Alta Resistencia y Convencionales con Ceniza de Cáscara de**

- Arroz.** In: XXIX JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 20 p, Punta del Este, 2000.
- ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S. **Lime Requirement for Stabilization.** Transportation Research Record, n. 1721, pp. 9-18, Washington, D.C., 2000.
- SANTOS, G. T.; POMATTI, K. E. **Estabilização do Solo da Região de São Pedro de Alcântara/SC visando a Utilização na Pavimentação.** In: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, pp. 43-52, Brasília, 2000.
- SEDDOM, P. A.; BHINDI, D B. **Improvement of a Substandard Base Aggregate with Lime.** Transportation Research Record, n. 941, pp. 31-37, Washington, D.C., 1983.
- 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, pp. 27-32, 1998.
- SMITH, R. G.; KAMWANJA, G. A. **The use of Rice Husk for Making a Cementitious Material.** Proc: JOINT SYMPOSIUM ON THE USE OF VEGETABLE PLANTS AND THEIR FIBERS AS BUILDING MATERIAL, Baghdad, 1986.
- THOMÉ, A. **Estudo de Comportamento de um Solo Mole com Cal, Visando seu uso em Fundações Superficiais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS, 150 p., Porto Alegre, 1994.
- THOMPSON, M. R. **Soil-Lime Mixtures for Construction of Low-Volume Roads.** Transportation Research Board Special Report, n. 160, pp. 149-165, Washington, D.C., 1975.
- THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Illinois Soils.** Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divisions, ASCE, v. 92, pp. 67-92, New York, 1966a.
- THOMPSON, M. R. **Shear Strength and Elastic Properties of Lime-Soil Mixtures.** Highway Research Record, n. 139, pp. 1-14, Washington D.C., 1966b.

- THOMPSON, M. R. **Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils.** Highway Research Record, n. 92, pp. 69-82, Washington, D.C., 1965.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). **Lime Stabilization, Reactions, Properties, Design and Construction.** TRB, State of the Art Report, 5, 58 p., USA, 1987.
- TUNCER, E. R. ; BASMA, A. A. **Strength and Stress-Strain Characteristics of a Lime-Treated Cohesive Soil.** Transportation Research Record, n. 1295, p. 70-79, Washington D.C., 1991.
- VELUPILLAI, L., MAHIN, D. B., WARSHAW, J. W., WAILES, E. J. **A Study of the Market for the Rice-Husk-to-Energy Systems and Equipment.** Louisiana Agricultural Centre, 24 p., Louisiana, 1996.
- WILLIAMS, F. H. P.; SOMPONG, S. **Some Properties of Rice Hull Ash;** Geotechnical Engineering Journal, Southeast Asian Geotechnical Society, n. 2; pp. 75 – 81, 1971.
- ZHANG, M. H.; LASTRA, R.; MALHOTRA, V. M. **Rice Husk Ash as Paste and Concrete: Some Aspects of Hydration and the Microstructure of the Interfacial Zone between the Aggregate and Paste.** Cement and Concrete Research, v. 26 (6), pp. 963-977, 1996.