

FERNANDO HENRIQUE MARTINS PORTELINHA

**EFEITOS DA CAL E DO CIMENTO NA MODIFICAÇÃO DOS SOLOS
PARA FINS RODOVIÁRIOS: MECANISMOS DE REAÇÃO, PARÂMETROS
DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E RESISTÊNCIA MECÂNICA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2008

FERNANDO HENRIQUE MARTINS PORTELINHA

**EFEITOS DA CAL E DO CIMENTO NA MODIFICAÇÃO DOS SOLOS
PARA FINS RODOVIÁRIOS: MECANISMOS DE REAÇÃO, PARÂMETROS
DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E RESISTÊNCIA MECÂNICA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2008.




Prof. Maria Lucia Calijuri



Prof. Mauricio Paulo Ferreira Fontes
(Co-Orientador)



Pesq. Tiago Pinto da Trindade



Prof. Geraldo Luciano de O. Marques



Prof. Dario Cardoso de Lima
(Orientador)

*Aos meus pais,
Meus avós Genoveva e Sezino “In memoriam”,
Aos meus irmãos*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo acalento e força nos momentos de fraqueza.

Aos meus pais Ildfonso e Sueli, por acreditar nas minhas escolhas ao longo de toda minha vida, pela dedicação a minha formação educacional, pelos conselhos sempre necessários e pelo amor incondicional.

A toda minha família, em especial meus irmãos Neto, Ricardo e Carol, pelo carinho e companheirismo ao longo de nossa criação.

Aos meus amigos Francelino, Lucas, Breno, Marcelo “Tchelo”, Ernani, Rejane e Simone, pelo companheirismo, conselhos e momentos de lazer.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realização do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Aos Departamentos de Engenharia Civil (DEC) e Solos (DPS) da UFV, pela disposição da infra-estrutura necessária à realização dessa pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro para o desenvolvimento dessa pesquisa, através do Processo TEC APQ-0830-5.07/07.

Ao professor Dario Cardoso de Lima, pela orientação, dedicação, paciência e confiança durante a realização desse trabalho. Pelos conselhos e ensinamentos durante esta etapa.

Às professoras Izabel Christina Duarte de Azevedo e Rejane Nascentes, pelo carinho, por acreditar na minha capacidade e dar oportunidade no meio científico.

Ao professor Décio Lopes Cardoso, por me encorajar nessa busca.

Aos meus grandes amigos, Maria Lucia Cardoso Russo e José Roberto Russo, pela hospitalidade, por nos abraçar junto a toda sua família e pela ajuda nos momentos de dificuldades.

Aos professores co-orientadores Carlos Alexandre Braz de Carvalho, Maurício Paulo Ferreira Fontes, pelas críticas e sugestões, essenciais para a elaboração desse trabalho.

À Rafaela Stehling, bolsista de iniciação científica, pela dedicação ao trabalho.

Ao professor Paulo Sérgio de Almeida Barbosa, pelo apoio técnico necessário.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil, em especial Julio Carlos dos Santos, pela expressiva colaboração.

Enfim, a todos não citados, mas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

FERNANDO HENRIQUE MARTINS PORTELINHA, filho de Ildfonso Martins Portelinha e Sueli do Rocio Trindade Portelinha, é natural de Francisco Beltrão, Paraná.

Em março de 2000, ingressou no Curso de Engenharia Civil na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Paraná. Em fevereiro de 2006 graduou-se Engenheiro Civil.

Em maio de 2006, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, área de concentração em Geotecnia, ao nível de mestrado. Submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2008.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE ABREVIATURA E SÍMBOLOS.....	xxi
RESUMO	xxiv
ABSTRACT	xxvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. PECULIARIDADES DOS SOLOS TROPICAIS: UMA VISÃO GEOTÉCNICA	6
2.3. INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO ARGILA NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS.....	7
2.3.1. Natureza elétrica dos minerais de argila	8
2.3.2. Capacidade de troca catiônica (CTC).....	10
2.3.3. Floculação e dispersão das partículas de argila	13
2.3.4. Ponto de carga zero (PCZ).....	14
2.4. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM USO DA CAL	17
2.4.1. Mecanismos de reação solo-cal	17
2.4.2. A cal	18
2.4.3. Reações de troca e floculação	21
2.4.4. Ação de carbonatação	23
2.4.5. Ação de cimentação	24
2.4.6. Alteração de algumas propriedades do solo pela adição da cal.....	27
2.4.6.1. Granulometria	28
2.4.6.2. Plasticidade	28
2.4.6.3. Compactação.....	30

2.4.6.4.	Resistência mecânica.....	31
2.4.6.5.	Expansão.....	33
2.5.	ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS COM USO DE CIMENTO	33
2.5.1.	O cimento.....	34
2.5.2.	Mecanismo de reação solo-cimento.....	37
2.5.3.	Efeitos a curto prazo.....	37
2.5.4.	Efeitos a longo prazo.....	38
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1.	MATERIAIS.....	40
3.1.1.	Solos.....	40
3.1.2.	Aditivos químicos.....	44
3.2.	MÉTODOS.....	45
3.2.1.	Programa experimental.....	45
3.2.2.	Preparação das amostras.....	49
3.2.3.	Preparação das misturas.....	49
3.2.4.	Análise Granulométrica e Peso específico dos sólidos.....	49
3.2.5.	Limites de Atterberg.....	50
3.2.6.	Ensaio de compactação.....	50
3.2.7.	Moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios de compressão não-confined.....	50
3.2.8.	Ensaio de resistência à compressão não-confined.....	51
3.2.9.	Caracterização química.....	51
3.2.10.	Caracterização Mineralógica.....	52
3.2.11.	Análise estatística dos dados.....	54
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	55
4.1.1.	Análise granulométrica.....	55
4.1.2.	Limites de Atterberg.....	67
4.2.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO.....	76
4.3.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO NÃO-CONFINADA.....	88
4.4.	PROPRIEDADES QUÍMICAS DOS SOLOS E MISTURAS.....	104
4.5.	RESULTADOS DAS ANÁLISES MINERALÓGICAS.....	109
4.5.1.	Resultados das análises de produtos amorfos.....	109

4.5.2. Resultados das análises mineralógicas via difratometria de raios-X.....	131
4.6. DISCUSSÕES GERAIS	148
5. CONCLUSÕES	152
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	154
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Capacidade de troca catiônica de alguns minerais de argila (MEURER, 2006).....	13
Tabela 2.2. Valores médios da composição das cales usadas no Brasil (GUIMARÃES, 1997).	20
Tabela 2.3. Componentes básicos do cimento Portland	35
Tabela 3.1. Características geotécnicas e classificações TRB e USC dos solos estudados.....	43
Tabela 3.2. Índices classificatórios e classificação MCT dos solos (TRINDADE, 2006).....	43
Tabela 3.3. Composição química do cimento utilizado.....	45
Tabela 3.4. Composição química da cal utilizada.....	45
Tabela 4.1. Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.....	60
Tabela 4.2. Teste de médias (Tukey) dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cal, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si.....	60
Tabela 4.3. Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.....	61
Tabela 4.4. Teste de médias (Tukey) dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cimento, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para	

	cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si.....	61
Tabela 4.5.	Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 2-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.....	65
Tabela 4.6.	Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 2-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.....	66
Tabela 4.7.	Valores dos limites de Atterberg das misturas solo 1-cal para diferentes teores e tempos entre mistura e realização dos ensaios.....	67
Tabela 4.8.	Valores dos limites de Atterberg das misturas solo 1-cimento para diferentes teores e tempos entre mistura e realização dos ensaios.....	68
Tabela 4.9	Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 1-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.....	71
Tabela 4.10.	Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 1-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.....	71
Tabela 4.11.	Valores dos limites de Atterberg das misturas solo 2-cal para diferentes teores e tempos entre mistura e realização dos ensaios.....	72
Tabela 4.12.	Valores dos limites de Atterberg das misturas solo 2-cimento para diferentes teores e tempos entre mistura e realização dos ensaios.....	72

Tabela 4.13. Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 2-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.....	76
Tabela 4.14. Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 2-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.....	76
Tabela 4.15. Teste de médias (Tukey) dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 1-cimento, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si.	76
Tabela 4.16. Valores da peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_{ot}) para o solo1 e misturas para diferentes teores de cal e tempos entre mistura e compactação.	77
Tabela 4.17. Valores da peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_{ot}) para o solo1 e misturas para diferentes teores de cimento e tempos entre mistura e compactação.	77
Tabela 4.18. Análise de variância dos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ w_{ot} das misturas solo 1-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.....	80
Tabela 4.19. Análise de variância dos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot} das misturas solo 1-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.	81
Tabela 4.20. Valores da peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_{ot}) para o solo 2 e misturas para diferentes teores de cal e tempos entre mistura e compactação.	81

- Tabela 4.21. Valores da peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_{ot}) para o solo 2 e misturas para diferentes teores de cimento e tempos entre mistura e compactação. 81
- Tabela 4.22. Análise de variância dos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ w_{ot} das misturas solo 2-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio..... 87
- Tabela 4.23. Análise de variância dos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ w_{ot} das misturas solo 2-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio. 87
- Tabela 4.24. Análise fatorial de variância dos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 1-cal , para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio, Trat. 1 – tempos de cura, Trat. 2 – teores de estabilizante..... 92
- Tabela 4.25. Análise de variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 1-cal, sem interação entre os tratamentos, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio, Trat. 1 – tempos de cura, Trat. 2 – teores de estabilizante..... 92
- Tabela 4.26. Teste de médias (Tukey) dos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 1-cal, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si..... 92
- Tabela 4.27. Análise fatorial da variância dos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 1-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos

	quadrados, Q.M. – Quadrado médio, Trat. 1 – adição do estabilizante, Trat. 2 – tempos de cura.....	95
Tabela 4.28.	Análise de variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 1-cimento, sem interação entre os tratamentos, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio, Trat. 1 – adição do estabilizante, Trat. 2 – tempos de cura	94
Tabela 4.29.	Teste de médias (Tukey) dos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 1-cimento, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si.	96
Tabela 4.30.	Análise fatorial de variância dos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 2-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.....	99
Tabela 4.31.	Análise de variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 2-cal, sem interação entre os tratamentos, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio	97
Tabela 4.32.	Teste de médias (Tukey) dos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 2-cal, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si.....	99
Tabela 4.33.	Análise fatorial da variância dos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 2-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – Grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio.....	103

- Tabela 4.34. Análise de variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 2-cimento, sem interação entre os tratamentos, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio 101
- Tabela 4.35. Teste de médias (Tukey) dos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 2-cimento, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si. 102
- Tabela 4.36. Resultados das análises químicas das misturas do solo 1 com cal e cimento, para o período de cura de 7 dias, sendo: pH – potencial hidrogeniônico; Δ pH – diferença entre pH em KCl e pH medido em H₂O; PCZ – ponto de carga zero; SB - soma de bases trocáveis; t – capacidade de troca catiônica efetiva; T – capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – índice de saturação de bases. 105
- Tabela 4.37. Resultados das análises químicas das misturas do solo 2 com cal e cimento, para o período de cura de 7 dias, sendo: pH – potencial hidrogeniônico; Δ pH – diferença entre pH em KCl e pH medido em H₂O; PCZ – ponto de carga zero; SB - soma de bases trocáveis; t – capacidade de troca catiônica efetiva; T – capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – índice de saturação de bases. 106
- Tabela 4.38. Resultados das análises químicas das misturas do solo 1 com cal e cimento, para o período de cura de 28 dias, sendo: pH – potencial hidrogeniônico; Δ pH – diferença entre pH em KCl e pH medido em H₂O; PCZ – ponto de carga zero; SB - soma de bases trocáveis; t – capacidade de troca catiônica efetiva; T – capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – índice de saturação de bases. 107
- Tabela 4.39. Resultados das análises químicas das misturas do solo 2 com cal e cimento, para o período de cura de 28 dias, sendo: pH –

	potencial hidrogeniônico; ΔpH – diferença entre pH em KCl e pH medido em H_2O ; PCZ – ponto de carga zero; SB - soma de bases trocáveis; t – capacidade de troca catiônica efetiva; T – capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – índice de saturação de bases.	108
Tabela 4.40.	Resultados dos ataques seqüenciais para quantificação de amorfos das misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.....	113
Tabela 4.41.	Resultados dos ataques seqüenciais para quantificação de amorfos das misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.....	114
Tabela 4.42.	Resultados dos ataques seqüenciais para quantificação de amorfos das misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.....	124
Tabela 4.43.	Resultados dos ataques seqüenciais para quantificação de amorfos das misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.....	125
Tabela 4.44.	Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cal nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 7 dias	134
Tabela 4.45.	Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração areia (\geq 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cal nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 7 dias	134
Tabela 4.46.	Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cal nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 28 dias	138
Tabela 4.47.	Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração areia (\geq 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cal nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 28 dias	138

Tabela 4.48. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cimento nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 7 dias.....	141
Tabela 4.49. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração areia (\geq 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cimento nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 7 dias	141
Tabela 4.50. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cimento nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 28 dias.....	145
Tabela 4.51. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração areia (\geq 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cimento nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 28 dias.....	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Mecanismos de estabilização solo-cal (INGLES & METCALF, 1972).....	25
Figura 3.1.	Fotografias ilustrativas dos solos e dos locais de coleta das amostras.....	42
Figura 3.2.	Curvas de distribuição granulométrica para os solos 1 e 2.	44
Figura 3.3.	Fluxograma do programa experimental.	48
Figura 4.1.	Variação das frações granulométricas das misturas solo 1-cal (a) e solo 1-cimento (b), e a influência dos tempos decorridos entre mistura e realização do ensaio de granulometria.....	56
Figura 4.2.	Variação das frações granulométricas das misturas solo 1- 1% cal (a), solo 1-2% cal (b), solo 1-3% cal (c), solo 1-1% cimento (d), solo 1-2% cimento (e) e solo 1-3% cimento (f), e a influência dos tempos de descanso entre mistura e a realização do ensaio de granulometria.	57
Figura 4.3.	Variação das frações granulométricas das misturas solo 2-cal (a) e solo 2-cimento (b), com os tempos de descanso entre mistura e realização do ensaio de granulometria.	63
Figura 4.4.	Variação das frações granulométricas das misturas solo 2- 1% cal (a), solo 2-2% cal (b), solo 2-3% cal (c), solo 2-1% cimento (d), solo 2-2% cimento (e) e solo 2-3% cimento (f), com os tempos de descanso entre mistura e a realização do ensaio de granulometria.....	64
Figura 4.5.	Influência da adição de cal nos parâmetros de plasticidade do solo 1, para diferentes períodos de tempo entre misturas e a realização dos ensaios.....	67
Figura 4.6.	Influência da adição de cimento nos parâmetros de plasticidade do solo 1, para diferentes períodos de tempo entre misturas e a realização dos ensaios.	69
Figura 4.7.	Influência da adição de cal nos parâmetros de plasticidade do solo 2, para diferentes períodos de tempo entre misturas e a realização dos ensaios.....	71

Figura 4.8.	Influência da adição de cimento nos parâmetros de plasticidade do solo 2, para diferentes períodos de tempo entre misturas e a realização dos ensaios.	73
Figura 4.9.	Influência do tempo entre mistura e compactação no peso específico aparente seco máximo das misturas solo 1 - cal e cimento.	78
Figura 4.10.	Influência do tempo entre mistura e compactação no umidade ótima das misturas solo 1 – cal.	78
Figura 4.11.	Influência do tempo entre mistura e compactação no umidade ótima das misturas solo 1 – cimento.	79
Figura 4.12.	Efeito imediato da cal e cimento nos parâmetros ótimos de compactação das misturas com o solo 1.	82
Figura 4.13.	Influência do tempo entre mistura e compactação no peso específico aparente seco máximo das misturas solo 2 - cal e cimento.	84
Figura 4.14.	Influência do tempo entre mistura e compactação no teor de umidade ótima das misturas solo 2 – cal.	84
Figura 4.15.	Influência do tempo entre mistura e compactação no teor de umidade ótima das misturas solo 2 – cimento.	85
Figura 4.16.	Efeito imediato da cal e cimento nos parâmetros ótimos de compactação das misturas com o solo 2.	88
Figura 4.17.	Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 1-cal, para o período de cura dos corpos-de-prova de 7 dias.	89
Figura 4.18.	Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 1-cal, para o período de cura dos corpos-de-prova de 28 dias.	89
Figura 4.19.	Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 1-cimento, para o período de cura dos corpos-de-prova de 7 dias.	93
Figura 4.20.	Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 1-cimento, para o período de cura dos corpos-de-prova de 28 dias.	93

Figura 4.21.	Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 2-cal, para o período de cura dos corpos-de-prova de 7 dias.	97
Figura 4.22.	Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 2-cal, para o período de cura dos corpos-de-prova de 28 dias.	97
Figura 4.23.	Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 2-cimento, para o período de cura dos corpos-de-prova de 7 dias.	100
Figura 4.24.	Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 2-cimento, para o período de cura dos corpos-de-prova de 28 dias.	101
Figura 4.25.	Curva de extração de Si amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.	115
Figura 4.26.	Curva de extração de Si amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.	115
Figura 4.27.	Curva de extração de Al amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.	116
Figura 4.28.	Curva de extração de Al amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.	116
Figura 4.29.	Curva de extração de Ca ²⁺ trocáveis para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias. ...	117
Figura 4.30.	Curva de extração de Ca ²⁺ trocáveis para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias. .	117
Figura 4.31.	Curva de extração Mg amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.	118
Figura 4.32.	Curva de extração de Mg amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.	118
Figura 4.33.	Curva de extração de Fe amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.	119
Figura 4.34.	Curva de extração de Fe amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.	119

Figura 4.35.	Curva de extração da fase amorfa dos minerais de silício para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.....	126
Figura 4.36.	Curva de extração de Si amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.....	126
Figura 4.37.	Curva de extração de Al amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.....	127
Figura 4.38.	Curva de extração de Al amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.....	127
Figura 4.39.	Curva de extração de Ca^{2+} trocáveis para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.	128
Figura 4.40.	Curva de extração de Ca^{2+} trocáveis para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias. .	128
Figura 4.41.	Curva de extração de Mg amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.....	129
Figura 4.42.	Curva de extração de Mg amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.....	129
Figura 4.43.	Curva de extração de Fe amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.....	130
Figura 4.44.	Curva de extração de Fe amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.....	130
Figura 4.45.	Difratograma da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras do solo 1 e 2 não tratados (a), e misturas com cal nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 7 dias.	134
Figura 4.46.	Difratograma da fração areia (\geq 0,05 mm) das amostras do solo 1 e 2 não tratados (a), e misturas com cal nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 7 dias.....	135
Figura 4.47.	Difratograma da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras do solo 1 e 2 não tratados (a), e misturas com cal nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 28 dias. .	138
Figura 4.48.	Difratograma da fração areia (\geq 0,05 mm) das amostras do solo 1 e 2 não tratados (a), e misturas com cal nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 7 dias.....	139

Figura 4.49. Difratoograma da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras do solo 1 e 2 não tratados (a), e misturas com cimento nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 7 dias.	141
Figura 4.50. Difratoograma da fração areia (\geq 0,05 mm) das amostras do solo 1 e 2 não tratados (a), e misturas com cimento nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 7 dias. ...	142
Figura 4.51. Difratoograma da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras do solo 1 e 2 não tratados (a), e misturas com cimento nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 28 dias.	145
Figura 4.52. Difratoograma da fração areia (\geq 0,05 mm) das amostras do solo 1 e 2 não tratados (a), e misturas com cimento nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 28 dias. .	146

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACH	Aluminato hidratado de cálcio
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CSAHF	Cálcio-silicato-aluminato de ferro
Ct	Caulinita
CTC	Capacidade de troca catiônica
c'	Coefficiente c' da classificação MCT
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
d'	Coefficiente d' da classificação MCT
e'	Índice e' da classificação MCT
FV	Fator de variação
Gb	Gibbsita
GL	Grau de liberdade
Gr	Grossular
Gt	Goethita
(H+Al)	Acidez potencial
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LP	Limite de plasticidade
LPF	Ponto de fixação de cal
Mi	Mica
PCZ	Ponto de carga zero
PCZES	Ponto de carga zero por efeito salino
pH	Potencial hidrogeniônico
P _i '	Perda de massa por imersão
QM	Quadrado médio
Qz	Quartzo
Ra	Rankinita
RCNC	Resistência a compressão não-confinada
SB	Soma de bases trocáveis
SCH	Silicato hidratado de cálcio
SQ	Soma dos quadrados
T	Capacidade de troca catiônica total em pH 7,0
t(%)	Capacidade de troca catiônica efetiva
TFSA	Terra fina seca ao ar
TRB	Transportation Research Board
V	Índice de saturação de bases
\bar{X}	Média
w	Umidade
w _{ot}	Umidade ótima
γ_d	Peso específico aparente seco
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso específico aparente seco máximo

γ_s	Peso específico dos sólidos
Φ	Diâmetro
σ_0	Densidade de cargas
ΔpH	Diferença entre o pH em KCl e o pH medido em H_2O (relação v:v igual a 1: 2,5)
θ	Ângulo de Bragg

RESUMO

PORTELINHA, Fernando Henrique Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2008. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica.** Orientador: Dario Cardoso de Lima. Co-Orientadores: Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Maurício Paulo Ferreira Fontes.

Nessa pesquisa, avaliou-se o emprego de pequenos teores de cal hidratada e de cimento Portland na estabilização química de dois solos residuais de gnaiss da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brasil, com vistas a aplicações em estradas. O estudo abrangeu os seguintes tópicos: (i) caracterização tecnológica dos solos e misturas, envolvendo ensaios de caracterização (granulometria e limites de Atterberg) dos solos melhorados com cimento e com cal, considerando-se diferentes teores de estabilizantes e períodos de cura; (ii) determinação dos parâmetros de compactação (w_{ot} e $\gamma_{dmáx}$) e de resistência à compressão não-confinada; (iii) estudo da influência de natureza química e mineralógica na resposta mecânica dos solos, considerando-se mecanismos de reação das misturas solo-cal e solo-cimento via a determinação de parâmetros químicos (pH, CTC, SB, V, etc) e mineralógicos (produtos amorfos e cristalinos) dos solos e misturas; (iv) efeito dos aditivos nos solos, considerando-se a avaliação da influência do período decorrido entre mistura e a realização dos ensaios de caracterização, compactação e de resistência mecânica, buscando-se representar condições de execução no campo. Os resultados obtidos no presente estudo levaram às seguintes conclusões: (i) os baixos teores de cal e cimento utilizados nas misturas provocaram variações pouco significativas nos parâmetros de caracterização geotécnica dos solos, sendo estes, também, pouco influenciados pelo tempo decorrido entre mistura e realização dos ensaios; (ii) os parâmetros de compactação das misturas não mostraram variações significativas e apresentaram comportamentos oscilantes com os tempos entre mistura e compactação; (iii) as análises químicas mostraram que o pH, CTC e SB e íons cálcio sofreram incrementos

com o aumento dos teores de cal e cimento avaliados; (iv) os aumentos na CTC foram responsáveis pelas modificações nos parâmetros IP, constituição granulométrica, γ_{dmax} e nos valores de pH dos solos, bem como pela dissolução dos minerais de sílica e alumina da fração argila do solo; (v) a adição dos estabilizantes aos solos produziu aumentos nas suas resistências à compressão não-confinada associados, na maioria das vezes, à formação de produtos amorfos, sendo que onde se observou a formação de novos minerais, tais como Rankinita e Grossular, se obtiveram maiores taxas de aumento na resistência mecânica.

ABSTRACT

PORTELINHA, Fernando Henrique Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2008. **Effects of the addition of lime and Portland cement in soil modification for road engineering applications: reaction mechanisms, geotechnical characterization and mechanical strength parameters.** Adviser: Dario Cardoso de Lima. Co-Advisers: Carlos Alexandre Braz de Carvalho and Maurício Paulo Ferreira Fontes.

This research addresses the application of low amounts of lime and Portland cement in the stabilization of two gneiss residual soils from the Zona da Mata Norte of Minas Gerais state, Brazil, for road engineering applications. The study encompassed the following topics: (i) technological characterization of soils and their mixtures, involving geotechnical characterization tests (grain size distribution and Atterberg limits) using different amounts of stabilizers and curing times; (ii) determination of the compaction optimum parameters (w_{ot} e γ_{dmax}) and unconfined compression strength; (iii) study of the influence of the chemical and mineralogical properties in the soils mechanical strength considering soil-stabilizers reaction mechanisms via the determination of chemical (pH, CEC, SB, V, etc) and mineralogical (amorphous and crystalline products) soils and mixtures parameters; (iv) effects of the addition of the stabilizers to soils considering the evaluation of the effect of the time between mixture and testing in the geotechnical characterization, compaction and mechanical strength parameters of soils in order to reproduce field conditions. The analysis of the testing date program supports that: (i) the low amounts of stabilizers used produced small variations, as well as it was observed little influence of the time between mixture and testing in the tested soils parameters (geotechnical characterization and mechanical strength); (ii) addition of the stabilizers did not produce significant variation in the soils optimum compaction parameters, and it was not observed a defined trend behavior in the influence of time between mixture and compacting on them; (iii) the chemical analyses testing data showed increase in pH, CTC and SB and

calcium ions with the used stabilizers amounts; (iv) increases in the CTC were responsible for modifications of the soils PI, grain size distribution, γ_{dmax} , and increases of pH produced dissolution of silica and alumina from soils clay fractions; (v) addition of stabilizers to soils resulted in increases in their unconfined compression strength that could be associated to amorphous products formation, as well as new products formation were responsible for higher mechanical strength increase rates.

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A estabilização química dos solos é uma prática técnico-construtiva consagrada internacionalmente para a construção de rodovias. Dentre os produtos comumente utilizados para este fim, podem-se citar o cimento Portland e a cal hidratada.

No Brasil, as misturas solo-cimento têm sido empregadas em trabalhos de pavimentação rodoviária desde fins da década de 30 do século passado (TRINDADE, 2006), sendo que, a partir de 1941, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) iniciou suas pesquisas nesta área. Presentemente, o Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT), em seu Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), refere-se a: (i) teores de cimento na faixa de 6% a 10%, como “misturas solo-cimento” para camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários com significativa rigidez à flexão; (ii) teores de cimento de 2% a 4%, para “solos melhorados com cimento”, com a finalidade de modificar a plasticidade e a sensibilidade dos solos à ação da água, mas sem que ocorra cimentação acentuada dos mesmos, do que resultam camadas consideradas flexíveis.

Por outro lado, a experiência rodoviária brasileira com misturas solo-cal data da década de 60 do século passado, inicialmente ao nível de pesquisa, podendo-se referir aos trabalhos de: (i) Pinto (1964), em que se relata a estabilização de um solo A-7-5 com pequenas quantidades de cal e se apresenta um conjunto de resultados de ensaios de resistência à compressão não-confinada e CBR; (ii) Pinto (1965), onde se destaca o resultado de um estudo mais abrangente, englobando um universo de oito solos e sete cales comerciais; (iii) Batista (1969), onde se apresenta o resultado de um estudo dirigido à análise da influência da cal na granulometria, plasticidade e resistência mecânica de solos do estado do Rio de Janeiro. Atualmente, o DNIT (2006) destaca o uso do termo “misturas

solo-cal”, para aquelas com teores de cal hidratada de 5% a 6%, que são empregadas como camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários com acentuada rigidez à flexão, enquadrando-as na classificação de misturas semi-rígidas, bem como se refere ao termo “solo melhorado com cal”, para as misturas que não apresentam ganhos acentuados de resistência mecânica, enquadrando-as na categoria de flexíveis.

No que diz respeito à experiência brasileira e internacional com solos tropicais, um fato incontestável é a escassez de pesquisas dirigidas ao estudo dos mecanismos de reação e à análise da influência de pequenos teores de cimento Portland e de cal hidratada nos parâmetros geotécnicos determinados via ensaios de caracterização (LL, LP e granulometria) e de resistência mecânica (resistência à compressão não-confinada) dos *solos melhorados*, o que constitui o objeto da presente proposta de trabalho.

Dentro da visão de estudos geotécnicos realizados com solos da Zona da Mata Mineira, este projeto direciona-se à caracterização tecnológica em laboratório de solos melhorados com cimento e com cal para fins rodoviários. Justifica-se a necessidade de se desenvolver o presente estudo pelo fato de que solos melhorados com esses produtos comerciais podem ser considerados materiais com grande potencial para emprego como camadas de melhoria do subleito, reforço, sub-base e, mesmo, base de pavimentos rodoviários na Zona da Mata Mineira e, também, em outras áreas do Brasil. Nesse contexto, é de interesse analisar a eficiência do cimento e da cal na melhoria dos solos, considerando mesmos teores de estabilizantes e mesmos períodos de cura das misturas, sob o prisma de mecanismos de reação, através de análises químicas e mineralógicas, e de resultados de ensaios de caracterização e de resistência mecânica. Por outro lado, razões de natureza econômica de mercado podem, temporalmente, definir o emprego de um ou de outro desses estabilizantes em obras rodoviárias.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho direcionou-se à estabilização química de dois solos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, coletados na cidade de Viçosa, com teores relativamente pequenos dos estabilizantes químicos cimento Portland e cal hidratada, na modalidade de *solos melhorados*, com vistas a aplicações em estradas. Os objetivos específicos foram estabelecidos, como segue: (i) caracterizações geotécnica, mecânica, química e mineralógica dos solos e dos solos melhorados com cimento e com cal, considerando-se diferentes teores de estabilizantes e períodos de cura; e, (ii) estudo dos parâmetros químicos e mineralógicos, possibilitando verificar os mecanismos de reação das misturas solo-cimento e solo-cal, bem como parâmetros de caracterização geotécnica e de resistência mecânica.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação está organizada, como segue:

- no capítulo 2 são revisados conceitos relativos à estabilização química dos solos com uso da cal e do cimento Portland, abordando-se, também, aspectos da fração argila dos solos, por ser a mesma responsável por muitas das reações químicas que ocorrem dentro do sistema solo-estabilizante;
- no capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados no presente estudo, bem como a metodologia empregada na realização do programa experimental;
- no capítulo 4 tem-se a apresentação e discussão dos resultados obtidos, com as subdivisões: (i) resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos e misturas; (ii) resultados dos ensaios de compactação dos solos e misturas; (iii) resultados dos ensaios de compressão não-confinada dos solos e misturas; (iv) parâmetros obtidos na caracterização química dos solos e misturas;

(v) resultados das análises mineralógicas dos solos e misturas, com quantificação de amorfos e difratogramas de raios-X; e

- nos capítulos 5 e 6 apresentam-se as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros, respectivamente.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. INTRODUÇÃO

As soluções para a estabilização química de solos para fins rodoviários são bastante discutidas na literatura (SILVA, 1968; RICO e DEL CASTILHO, 1977; LIMA, 1981; SENÇO, 2001; LIMA et al., 2003). Mas, nos últimos anos, tem havido uma crescente preocupação em buscar estabelecer princípios teóricos que possam explicar os mecanismos de atuação de cada um dos agentes estabilizantes disponíveis no mercado, particularmente no caso da estabilização química dos solos de clima tropical. Algumas questões podem ser levantadas sobre a reatividade do solo e como se desenvolve este processo de estabilização em termos das estruturas formadas no solo e a mineralogia.

Os mecanismos de estabilização química de um solo consistem nas alterações produzidas em sua massa pela introdução de uma pequena quantidade de aditivo químico, a qual lhe confere certas propriedades de engenharia pré-definidas em projeto (LIMA, 1981).

Resultados de trabalhos que mostram a eficiência do cimento e da cal na estabilização de solos arenosos e argilosos têm sido relatados na literatura (INGLES e METCALF, 1973; LIMA, 1981; FERRAZ, 1994; ALCÂNTARA, 1995; MENDONÇA, 1998). Contudo, poucos estudos têm sido desenvolvidos no campo da modificação de solos no Brasil e ao nível internacional, podendo-se referir, respectivamente, aos trabalhos de Pinto (1964), em que o autor apresenta resultados de uma pesquisa realizada com um solo A-7-5 estabilizado com pequenos teores de cal e de cimento, e de Osula (1996), em que o autor aborda a influência da adição de pequenos teores de cimento e de cal no comportamento geotécnico de um solo laterítico.

Um aspecto de grande interesse no emprego de aditivos químicos em estradas como agente de cimentação ou aglomerante é a análise da

influência do tempo decorrido entre mistura e compactação no produto final (camada do pavimento acabada), haja vista o conjunto de limitações práticas de execução das misturas no campo (SANT'ANA, 2003).

Neste capítulo apresentam-se algumas considerações teóricas sobre solos tropicais e sua estabilização química com cal e cimento Portland, enfatizando-se mecanismos de reações e visando à sua utilização para fins rodoviários.

2.2. PECULIARIDADES DOS SOLOS TROPICAIS: UMA VISÃO GEOTÉCNICA

Genericamente, um solo tropical é caracterizado como aquele formado dentro da faixa tropical ou em região de clima tropical úmido. Contudo, isto não representa uma regra, o solo tropical deverá possuir propriedades de processos geológicos e/ou pedológicos típicos das regiões tropicais úmidas. Dentro da classificação geotécnica é indispensável que esse tipo de solo possua peculiaridades que traga distinção dos solos tradicionais de zonas temperadas. Essa definição é essencialmente tecnológica; portanto, não necessariamente científica. Dentre os solos tropicais, destacam-se duas grandes classes: os solos de comportamento laterítico e os solos saprolíticos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Os solos tropicais podem revelar comportamentos distintos relacionados com seu comportamento mecânico e hidráulico devido ao processo de latossolização. Esse processo ocorre devido às condições de intemperismo intenso, predominante em regiões tropicais úmidas, onde os cátions básicos são lixiviados, com conseqüente concentração residual de óxidos de ferro e de alumínio.

Em geral, os solos de comportamento laterítico constituem a camada mais superficial das áreas bem drenadas, com cores em que predominam matizes vermelho e amarelo, espessura que pode atingir mais de 2 m, porém só raras vezes ultrapassa 10 m. Caracterizam-se pela presença de grãos muito resistentes mecânica e quimicamente na fração areia e

pedregulho, principalmente quartzo, agregações lateríticas e, em menor escala, minerais pesados. A fração argila dos solos lateríticos é constituída essencialmente de argilominerais do grupo das caulinitas e de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio. Estes são responsáveis pela formação de agregações estáveis em presença de água, graças ao recobrimento dos argilominerais pelos hidróxidos e óxidos hidratados que, além de reduzirem a capacidade de adsorção de água, atuam como agentes cimentantes naturais entre as partículas. Macroscopicamente, percebe-se a presença de torrões bastante resistentes à ação hídrica, apresentando grande quantidade de vazios preenchidos de ar, o que justifica o seu baixo peso específico aparente e elevada permeabilidade (NOGAMI e COZZOLINO, 1993).

Já os solos saprolíticos são essencialmente residuais, o que explica a presença freqüente de grande variedade de minerais. Apresentam-se como camadas subjacentes aos solos de comportamento laterítico ou outros solos pedogenéticos, solos sedimentares ou transportados. As espessuras dessas camadas são das mais variadas, atingindo freqüentemente dezenas de metros. Suas cores variam muito, podendo em uma mesma amostra apresentar partes de diversas cores. Sua aparência macroscópica é em geral caracterizada pela presença de camadas, manchas, xistosidades, vazios, etc., em grande parte herdada da rocha matriz que lhes deu origem. Os minerais neoformados constituem, na maioria dos casos, associações pseudomorfas. Na fração argila pode ocorrer grande variedade de argilominerais e a fração silte pode ter mineralogia muito variada e peculiar, como macrocristais de caulinita e micas, que podem impor comportamentos peculiares a estes solos (NOGAMI e COZZOLINO, 1993).

2.3. INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO ARGILA NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS

A fração argila dos solos consiste na fração ativa que participa de praticamente todas as reações físico-químicas. São características dos minerais da fração argila: estado coloidal com a presença de cargas

elétricas; adsorção de íons; retenção de água; apresentam plasticidade e pegajosidade; são suscetíveis à dispersão e floculação; variam de volume conforme a umidade e desempenham papel importante na cor e agregação dos solos. Cabe salientar que o estado coloidal, exposição de toda superfície da partícula de argila, é responsável por todas as características citadas. Portanto, os fenômenos que ocorrem na superfície, são de grande importância dentro do contexto de estabilização química de solos.

Um sistema coloidal pode ser definido como um sistema de duas fases, no qual um material, em estado de tão grande desagregação, que se aproxima da subdivisão molecular (diâmetro $< 2\mu\text{m}$), se encontra heterogeneamente disperso em um segundo material (CARDOSO, 1994).

A natureza coloidal do sistema argila-água fez com que o seu comportamento fosse estudado com base na teoria da dupla camada difusa e sobre os aspectos mais relevantes, fazem-se, a seguir, algumas considerações.

2.3.1. Natureza elétrica dos minerais de argila

As reações químicas que se processam no sistema polidisperso solo são determinadas pelas cargas elétricas na superfície e grande área superficial dos minerais (colóides) presentes. A origem e a natureza das cargas são de extrema importância na magnitude das propriedades físicas e químicas dos solos, incluindo troca iônica, adsorção específica e interações de partículas.

Segundo Van Olphen (1963), a carga dos colóides do solo é resultado de imperfeições estruturais dos cristais ou da adsorção de certos íons na superfície dessas partículas. As superfícies dos colóides podem ser positivas ou negativas, isto é, contêm déficit ou excesso de elétrons.

As cargas elétricas existentes nas superfícies dos colóides são constituídas por cargas permanentes e/ou cargas dependentes (variáveis) conforme sua origem. As cargas permanentes são originadas da substituição

isomórfica dentro da estrutura dos argilominerais e são preferencialmente negativas. Essas cargas aparecem pela substituição de certos cátions dentro da estrutura por outros de menor valência, causando um déficit de carga positiva. Já as cargas dependentes são originadas de presença de bordas quebradas nos argilominerais que causam aparecimento de cargas elétricas que podem ser negativas ou positivas, dependendo do pH do meio, ou seja, dependentes do efeito de protonação e desprotonação das bordas.

O rompimento das bordas ocorre nas folhas tetraédricas e octaédricas, que expõe cátions (Si^{4+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , etc) ou ânions (O^{2-} , OH^-), que ficam sujeitos a efeitos de desprotonação e protonação. Van Olphen (1963) concluiu que, para valores baixos do pH, as bordas das folhas octaédricas são eletropositivas, enquanto que as bordas das folhas tetraédricas são neutras ou ligeiramente negativas. Já para valores elevados do pH, as bordas são eletricamente negativas tanto na folhas octaédricas quanto nas tetraédricas. Assim, pode-se admitir que as faces se encontram carregadas positivamente nos bordos e negativamente nas faces, com predominância da carga negativa uma vez que a área das faces é consideravelmente superior à dos bordos.

O excesso ou déficit de elétrons em conjunto com os íons presentes na solução do solo constitui uma dupla camada de cargas. Com a distribuição de cargas, um potencial elétrico máximo se desenvolve na superfície da partícula e decresce com a distância na solução. Se a dupla camada de cargas for resultado de imperfeições internas e substituições isomórficas estruturais, a densidade de cargas é constante, ao passo que o potencial elétrico de superfície é variável. Se a dupla camada for criada pela adsorção de íons determinantes de potencial (IDP), a densidade de cargas é variável enquanto que o potencial elétrico de superfície é constante e é determinado somente pela concentração ou atividade desses íons em solução (FONTES et al., 2001).

As considerações da dupla camada de cargas aqui desenvolvidas são baseadas na teoria de Gouy – Chapman, contornadas pelo aperfeiçoamento da teoria nas proposições de Stern. A teoria de Gouy –

Chapman é bastante discutida na literatura, por Mitchell (1993), Tan (1993), Bohn (1979) e Van Olphen (1963), dentre outros.

Os fatores que influenciam na espessura da dupla camada difusa são: concentração eletrolítica, valência do cátion, efeito da constante dielétrica, temperatura. Dentro do contexto da estabilização química dos solos, cabe enfatizar o efeito da valência do cátion e concentração eletrolítica.

O aumento da concentração de sais ou de eletrólitos ocasiona numa diminuição da dupla camada difusa. A alta concentração suprime a dupla camada, pois à medida que a concentração de cátions aumenta, existe uma pressão para que os cátions se movam para perto da superfície da partícula e diminui a tendência dos cátions de se difundirem para longe da superfície.

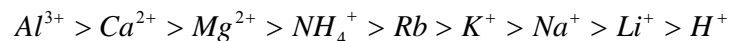
Já o efeito da valência do cátion influencia tanto no potencial de superfície quanto nas espessuras da dupla camada para uma mesma concentração eletrolítica da solução. Os cátions de maior valência promoverão uma neutralização de cargas mais efetiva na superfície da argila, ocasionando o efeito de repulsão entre as partículas e uma redução na espessura da dupla camada.

A adsorção preferencial de íons multivalentes, que é um fato experimental comprovado e também previsto (COLLIS-GEORGE e BOZEMAN, 1970), significa que mesmo quantidades pequenas de cátions di ou trivalentes adicionados a sistemas eletrolíticos argila-água monovalentes, podem ter uma influência acentuada sobre as propriedades físicas.

2.3.2. Capacidade de troca catiônica (CTC)

De modo a equilibrar as cargas negativas que predominam nas faces das partículas de argila, há a atração de íons carregados positivamente que se encontram nos sais dissolvidos na água intersticial, sendo que estes se mantêm ligados à superfície das partículas por ligações fracas, podendo assim ser facilmente substituídos por outros. Estes íons

designam-se por íons permutáveis, podendo ser classificados no que diz respeito à facilidade com que são atraídos, o que depende da valência dos cátions em solução. Ou seja, em reações de troca iônica, quando estão presentes íons de diferentes valências, são normalmente preferidos os íons de valência superior. Isto porque os íons menos hidratados têm uma maior capacidade de substituição, ou seja, quanto maiores os íons, mais difíceis serão as suas trocas. Quanto à valência, a preferência dos íons obedece a seguinte ordem decrescente:



Qualquer íon à esquerda pode substituir íons situados à sua direita, processo ao qual se denomina troca de cátions. A capacidade de troca de cátions de uma argila, definida pela quantidade de íons permutáveis em miliequivalentes de carga (m.e.q.) detidos em 100 g de argila seca, não é mais do que a quantidade de cátions permutáveis detidos nas partículas, que por sua vez é igual à quantidade de cargas negativas. O número de cátions permutáveis que são substituídos depende do nível de concentração de íons na solução envolvente.

Segundo O' Flaherty (1979), a eficiência com a qual os íons podem ser trocados um pelo outro depende dos seguintes fatores:

- concentração relativa ou número de íons: esta é uma aplicação da lei química de ação das massas, segundo a qual, com maior número de íons em solução, existe uma maior chance estatística de que a troca ocorra;
- número de carga dos íons: sendo as outras características iguais, quanto maior a valência de um íon, mais difícil é o seu deslocamento de uma partícula coloidal, quando o mesmo já se encontra unido a esta. A exceção à regra é o hidrogênio, que se comporta como um íon divalente ou trivalente;
- velocidade de movimento ou atividade dos diferentes íons: considerando os íons de mesma valência, a força necessária para o deslocamento de um íon qualquer tende a aumentar quando o

diâmetro efetivo do íon aumenta. Assim, íons menores são mais fáceis de serem deslocados do que outros maiores. A explicação para esse fenômeno baseia-se no fato de que, em uma solução de solo, os íons encontram-se todos hidratados, resultando em uma “casca de água”, envolvendo cada íon. Segundo a lei de Coulomb, os íons pequenos atraem uma grande quantidade de moléculas de água, fazendo com que uma espessa “casca de água” os envolva. Portanto, os íons pequenos, fortemente hidratados, acabam tendo maiores tamanhos efetivos do que aqueles fracamente hidratados, mas que inicialmente eram maiores. Como o grande tamanho efetivo dos íons reduz sua facilidade de movimento (velocidade de migração), além de reduzir o grau de tensão que o mantém unido à partícula coloidal, explica-se, então, o porquê da facilidade de deslocamento desses íons;

- tipo de argilomineral: sabe-se que os argilominerais diferem-se, consideravelmente, na quantidade de área exposta, sendo que o aumento desta contribui para as reações de troca. Logo, as montmorilonitas, que têm estruturas expansivas, possuem alta capacidade de troca, enquanto as caulinitas têm capacidade de troca relativamente baixa.

O processo de troca catiônica é essencialmente instantâneo desde que os íons tenham acesso à superfície. Se a difusão da (ou para) superfície coloidal é requerida, o processo não será instantâneo. Por exemplo, em condições de campo o solo forma agregados e grande parte das posições de troca estão dentro dos agregados. Assim, quando se coloca determinado cátion para deslocar outro, o primeiro terá que se mover por espaços e poros tortuosos que irão dificultar e diminuir a velocidade do processo de troca (FONTES, 1990_b).

A Tabela 2.1 apresenta valores de capacidade de troca catiônica de alguns argilominerais, segundo Meurer (2006).

Tabela 2.1. Capacidade de troca catiônica de alguns minerais de argila (MEURER, 2006)

Mineral	Capacidade de troca (meq/100g)
Caulinita	0 - 10
Ilita	80 - 100
Montomorilonita	800 - 1500
Óxidos de Fe e Al	20 - 40

2.3.3. Floculação e dispersão das partículas de argila

Os mecanismos de floculação-dispersão determinam a estrutura da argila, que por sua vez tem relação com as propriedades de resistência e de variação de volume de solo. O pequeno tamanho da partícula e sua grande área superficial tornam a argila suscetível aos efeitos dos campos de forças desbalanceadas, que surgem das interações entre as interfaces das partículas do solo, os cátions adsorvidos e a água (MITCHELL, 1993).

Uma vez que as partículas de argila carregam cargas líquidas negativas, elas se repelem eletrostaticamente. A repulsão entre as partículas adjacentes torna-se efetiva quando elas se aproximam o suficiente para que as suas duplas camadas se sobreponham. As forças atrativas de longo alcance (van der Waals) também atuam no sistema e a combinação dos efeitos atrativos e repulsivos condiciona o espaçamento entre as partículas. O efeito líquido resultante das interações na dupla camada poderá, então, promover a floculação ou a dispersão.

Em termos gerais, a teoria da dupla camada, desenvolvida por Gouy-Chapman, evidencia que a tendência de floculação se dá por um decréscimo na espessura da dupla camada, reduzindo a repulsão elétrica, em razão do aumento de determinadas variáveis (concentração eletrolítica do meio, valência do íon e temperatura); e da diminuição de outras características (constante dielétrica, tamanho do íon hidratado, pH e adsorção aniônica), segundo Lambe e Whitman (1979). Quanto menor o tamanho do raio hidratado do íon, mais próximo da superfície coloidal será

atraído, portanto, menor será a espessura da dupla camada e a tendência será de floculação.

A floculação está relacionada, também, à troca catiônica. Os íons que são trocados facilmente são aqueles que têm baixa carga e alta hidratação e são os que causam sistemas coloidais mais estáveis. Se somente existirem íons desse tipo no meio, a floculação só se dá quando a concentração de eletrólitos é elevada o suficiente para reprimir a dupla camada. Os íons que são trocados mais dificilmente (alta carga e baixa hidratação) causam sistemas coloidais que floculam mais facilmente e, por isto, menos estáveis. A presença deles no meio substitui os monovalentes que houver, e com baixa concentração de eletrólitos promovem floculação.

2.3.4. Ponto de carga zero (PCZ)

Segundo Fontes et al. (2001), o Ponto de Carga Zero (PCZ) é o pH para o qual a carga superficial de um sistema reversível de dupla camada é zero, sendo determinado por um valor particular de atividade dos íons determinantes de potencial na fase sólida. Segundo esse autor, essa definição foi usada por Raij e Peech (1972), Espinoza et al. (1975)¹ e Arnold (1977)², entre outros, sendo também complementada por Laverdière e Weaver (1977)³, que acrescentaram que, neste ponto, o potencial elétrico superficial é, também, nulo. Entretanto, ressalta Fontes et al. (2001), eles representaram este atributo como pH_{pcz} , sendo que Hendershot e Lavkulich

¹ ESPINOZA, W.; GAST, R.G.; ADAMS Jr., R.S. Charge characteristics and nitrate retention by two Andepts from South-Central Chile. **Soil Science Society of America Journal**, v.39, p.842-846, 1975.

² ARNOLD, P.W. Soil Science and the search for unifying concepts. **Journal of Soil Science**, v.28, p.393-402, 1977.

³ LAVERDIÈRE, M.R.; WEAVER, R.M. Charge characteristics of spodic horizons. **Soil Science Society of America Journal**, v.41, p.505-510, 1977.

(1978)⁴ complementaram que a carga líquida total da fase sólida no PCZ é nula, seja ela oriunda de cargas dependentes de pH, associadas com superfícies de óxidos hidratados, seja da matéria orgânica.

De acordo com Sposito (1989)⁵, citado por Fontes et al. (2001), a condição do PCZ é obtida experimentalmente no valor de pH no qual as partículas do solo não se movem num campo elétrico aplicado ou quando ocorre assentamento ou floculação delas. Esse ponto aparece quando o valor da densidade de cargas dissociadas é zero ($\sigma_D = 0$). Quando medido eletrocineticamente, ele é igual ao ponto isoelétrico. Cabe salientar que o PCZ geralmente representa o pH de máxima aglomeração de partículas e o menor potencial de solubilização do mineral.

Ainda, segundo Fontes et al. (2001), para os materiais com predominância de colóides com carga variável, existe um determinado valor de pH onde as curvas de titulação realizadas com soluções de diferentes concentrações de eletrólitos se interceptam. Nesse ponto, as concentrações dos íons H^+ e OH^- adsorvidos são as mesmas e a carga líquida independe da concentração salina, tornando-se nula e recebendo a denominação de Ponto de Carga Zero por Efeito Salino (PCZES). A determinação desse parâmetro é de grande importância em estudos de físico-química dos solos com cargas variáveis, pois alguns fenômenos eletroquímicos que ocorrem na interface sólido/líquido (como, por exemplo, a sorção de cátions e ânions) são influenciados pela distribuição superficial de cargas elétricas, que varia em função da diferença existente entre os valores de pH e de PCZES.

O PCZES é utilizado como estimativa do ponto de carga zero (PCZ) dos solos e, tem sido comumente determinado por titulação potenciométrica (VAN RAIJ e PEECH, 1972).

⁴ HENDERSHOT, W.H.; LAVKULICH, L.M. The use of ZPC to assess pedogenic development. **Soil Science Society of America Journal**, v.42, p.468-472, 1978.

⁵ SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 277p, 1989.

O PCZ influencia os fenômenos de floculação e dispersão das partículas. Em solos que apresentam cargas elétricas dependentes de pH, é possível fazer uma estimativa da predominância de cargas positivas ou negativas. Isso pode ser feito através de um índice denominado ΔpH , dado pela Equação 2.1:

$$\Delta pH = pH(KCl) - pH(H_2O) \quad (2.1)$$

sendo que o pH (KCl) é o pH do solo medido em solução 1 mol/L de KCl, e pH(H₂O) é o medido em água. Se o valor de ΔpH for positivo, então a carga líquida na superfície das partículas será positiva; ao contrário, se o valor ΔpH for negativo, a carga líquida será negativa. O pH em KCl fica menor que o pH em água, porque os íons K⁺ substituem os íons H⁺ que estão adsorvidos à partícula carregada negativamente, deslocando-os para a solução do solo aumentando desta forma a atividade dos íons H⁺ na solução, o que baixa o pH (MEURER, 2006).

Se um colóide de carga variável se encontra puro em um meio aquoso, é fácil de se observar o seu ponto ótimo de floculação que será o pH = PCZ, mas, quando se considera o sistema solo, não é tão simples assim. Existem outras variáveis relacionadas principalmente com a presença dos minerais de carga permanente, a atuação da concentração de eletrólitos no meio, a presença de cátions floculantes ou dispersantes, etc.

Se por um lado não se pode indicar com exatidão o ponto de floculação em um sistema, pode-se prever pelo menos o ponto que favorece a dispersão do solo. À medida que se eleva o pH e se afasta do pH = PCZ, maior é a probabilidade dos colóides do solo se dispersarem e manterem uma boa estabilidade na dispersão. Isso ocorre porque quanto maior o pH, maior será a tendência de criação de cargas negativas na caulinita e, principalmente nos óxidos de Fe e Al, minerais secundários comumente encontrados em solos tropicais. Aliado a isso, a existência de cátions caracterizados por um alto potencial zeta, como o Li⁺ ou Na⁺, favorecem a dispersão dos colóides e a manutenção da estabilidade (FONTES, 1990_a).

Se por outro lado, têm-se o pH com valores abaixo do PCZ do solo, haverá a tendência de promover maior número de cargas positivas que neutralizam cargas residuais negativas e, além disso, a concentração hidrogeniônica será tal que haverá um ataque ácido nas estruturas das argilas silicatadas liberando o Al do meio, além do Al solubilizado de outras fontes no solo que fará com que haja repressão da dupla camada difusa das argilas e conseqüentemente floculação dos colóides.

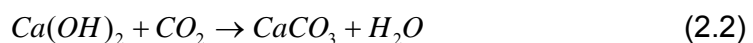
2.4. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM USO DA CAL

2.4.1. Mecanismos de reação solo-cal

Quanto aos mecanismos da estabilização solo-cal, informa-se que: (i) as reações de troca catiônica e floculação processam-se rapidamente e produzem alterações imediatas na plasticidade e, em menor escala, na resistência ao cisalhamento da mistura; (ii) dependendo das características dos solos a serem estabilizados, podem ocorrer reações pozolânicas entre o solo e a cal que resultam na formação de compostos de cimentação que aumentam a resistência e durabilidade da mistura e desenvolvem-se a médio e longo prazo (TRB, 1976).

Segundo esta publicação, acredita-se serem quatro os fenômenos que ocorrem:

- floculação - ocorre devido a três fatores: troca catiônica, aumento da CTC dependente do pH e aumento na concentração de eletrólitos na água dos poros;
- carbonatação - é a reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono do ar atmosférico, conforme a Equação 2.2. Esta reação é rápida e inicia-se imediatamente após a exposição da cal ao ar atmosférico;



- adsorção química de moléculas de Ca(OH)_2 ;
- reações pozolânicas - principal responsável pela cimentação. Ocorrem com material que contem sílica e alumina e que, estando finamente divididos, em presença de água, reagem com a cal.

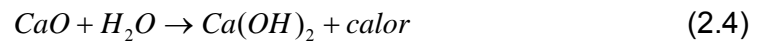
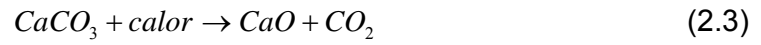
Segundo Attoh-Okine (1995), as características dos solos que influenciam as reações solo-cal são: pH do solo, teor de matéria orgânica, drenagem natural, presença excessiva de sódio permutável, mineralogia da fração argila, grau de intemperismo, presença de carbonatos e/ou sulfatos, ferro extraível,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

2.4.2. A cal

Segundo Guimarães (1997), a cal é produzida pela calcinação de calcário britado, onde o carbonato de cálcio presente na rocha é reduzido a óxido de cálcio. Calcina-se, também, o dolomito ou calcáreo dolomítico, que é uma rocha onde em sua composição encontram-se presentes os carbonatos de cálcio e magnésio. O óxido de cálcio produzido recebe o nome de cal cálcica e o produto contendo este óxido juntamente com o óxido de magnésio é denominado cal dolomítica, sendo ambos os tipos conhecidos como cal viva. A adição controlada de água à cal viva produz a cal hidratada, que é o produto de maior uso para fins rodoviários no Brasil.

A cal calcítica é suscetível de reagir muito rapidamente com a água com liberação de calor, produzindo-se a cal hidratada, em que todo óxido de cálcio se encontra convertido em hidróxido de cálcio. Já na cal dolomítica, o óxido de magnésio hidrata mais dificilmente e, assim, a maior parte permanece como óxido (CASTRO e SERAFIM LUIS, 1974).

A cal hidratada, obtida pela hidratação da cal viva, é encontrada na forma de pó seco. As reações de formação da cal viva e da cal hidratada, respectivamente, são representadas pelas Equações 2.3. e 2.4.



Conforme relatado por Guimarães (1997), as cales comercializadas no mercado brasileiro apresentam propriedades com valores médios mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Valores médios da composição das cales usadas no Brasil (GUIMARÃES, 1997)

Tipo de cal	CaO	MgO	Insolúvel no HCl	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	Perda ao Fogo	CO ₂	SO ₂	CaO+MgO Base de Não-Volátil	MgO Não Hidratado
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Cal Virgem Cálcica	90 - 98	0,1 - 0,8	0,5 - 3,5	0,2 - 1,0	0,5 - 5,0	0,2 - 3,8	0,1 - 0,6		-
Cal Hidratada Cálcica	70 - 74	0,1 - 1,4	0,5 - 2,5	0,2 - 0,8	23 - 27	1,5 - 3,5	0,1 - 0,0	96 - 98,5	0,5 - 1,8
Cal Virgem Dolomítica	51 - 61	30 - 37	0,5 - 4,5	0,2 - 1,0	0,5 - 4,8	0,5 - 4,5	0,05 - 0,1		-
Cal Hidratada Dolomítica	39 - 61	15 - 30	0,5 - 12,8	0,2 - 1,5	19 - 27	3,0 - 6,0	0,02 - 0,2	76,99	5 - 25

2.4.3. Reações de troca e floculação

As reações de efeito imediato são inicialmente correlacionadas com propriedades físicas dos solos, especialmente, com os limites de Atterberg e a granulometria (LIMA et al., 2003). Alguns fenômenos que podem originar esse efeito no processo da interação da cal com um solo fino são: troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção de cal e reações químicas.

Castro e Serafim (1974) relatam que, em alguns solos de Moçambique, quanto maior a permuta iônica, maiores são os benefícios da estabilização com uso de cal.

Segundo Osula (1996), as reações se iniciam com a dissociação da cal na presença de água na forma de íons Ca^{2+} e OH^- , ocasionando elevação do pH do solo. O excesso dos íons Ca^{2+} provoca a expulsão dos cátions presentes nos sítios de troca, ou são adsorvidas pelo solo se houver ânions disponíveis na superfície da partícula.

Hilt e Davidson (1960) argumentam que o aumento do pH do sistema resulta num aumento da sua capacidade de troca catiônica. Ainda relatam que as mudanças nas propriedades em sistemas solo-cal somente ocorrem acima de certo teor de cal, denominado como ponto de fixação da cal (LFP - *lime fixation point*). A cal acima ao LFP, continua na forma molecular e é utilizada na cimentação. Segundo o autor a fixação da cal está relacionada com a capacidade de troca de cátions (CTC) do solo.

O fenômeno de floculação pode ser resultado da troca catiônica ou devido o excesso de íons cálcio adsorvidos na superfície das partículas de argila, causando uma queda do potencial zeta ou do poder de repulsão (O'FLAHERTY, 1979). Há uma aglomeração causada pela atração das partículas ainda carregadas negativamente, com as carregadas positivamente afetadas pela troca catiônica. Osula (1996) supõe que as mudanças nas propriedades dos solos ocorrerão até que o processo de

aglomeração cesse. No entanto, é esperado que essas alterações reduzam com o tempo de forma exponencial.

Herrin e Mitchell (1961) observaram que um solo coesivo misturado com cal e deixado curar por um período de tempo, torna-se friável e adquire condição semelhante à de um silte. Postularam esses autores, que este fenômeno deve-se a uma reação de troca de bases, em que cátions cálcio da cal substituem íons metálicos mais fracos, tais como hidrogênio e sódio, na superfície da argila; e/ou adsorção de cátions cálcio adicional sobre a superfície da argila. Como a ligação entre duas partículas de argila depende da carga e do tamanho dos íons, a preponderância dos íons de cálcio, que substituíram os íons monovalentes, atrai as partículas entre si, tornando o solo mais friável e reduzindo sua plasticidade.

Alguns autores consideram que a formação do agente cimentante aluminato hidratado de cálcio é de grande importância no desenvolvimento da floculação-aglomeração nas misturas solo-cal (TRB, 1976).

Diamond e Kinter (1965) argumentam que apenas a troca de cátions e a floculação não podem ser consideradas como responsáveis pelo efeito estabilizante do solo. Citam o fato de que muitos solos em seu estado natural já são saturados de cálcio ou floculados e, mesmo assim, necessitam ser tratados para poderem ser usados em obras de engenharia. Segundo os autores, as melhorias nas propriedades plásticas devem-se às reações químicas imediatas que ocorrem nos pontos de contato aresta-face das partículas de argila, dentro dos flocos. Existe, nesta fase inicial, a formação de pequenas quantidades de aluminato hidratado tetracálcico, suficiente para estabilizar os flocos e entrelaçar as partículas, com conseqüente redução do IP, da contração e da expansibilidade do solo.

Bell e Coulthard (1990)⁶, citado por Bell (1996), argumentam que todos os tipos de minerais de argila reagem com a cal. No entanto, o fenômeno de troca catiônica não faz muita diferença em solos cauliniticos, já

⁶ BELL, F.G. AND COULTHARD, J.M.. Stabilization of clay soils with lime. **Mun. Engr.** 7:125-140,1990

em solos montmoriloníticos efeito é significativo. Solos expansivos tendem a reagir rapidamente com a cal, perdendo plasticidade rapidamente. Isso ocorre, pois argilas expansivas, como a montmorilonita, apresentam maiores capacidades de troca catiônica quando comparado com argilas caulínicas.

2.4.4. Ação de carbonatação

Segundo Guimarães (1997) é a combinação do óxido ou hidróxido de cálcio ou magnésio com o anidrido carbônico presente nas minúsculas bolhas de ar, absorvidas ou retiradas no momento da mistura ou pela penetração do ar nos poros após a execução. A reação tende a refazer o carbonato de cálcio, na forma de um novo corpo sólido que se entrelaça com os demais constituintes do solo. Ainda relata que sempre ocorre à formação de calcita (CaCO_3) em solos tratados com cal, mas sua quantidade é afetada pela cal disponível durante o processo de cura. Sua presença provavelmente auxilia na ligação das partículas de argila.

Entretanto, Herrin e Mitchell (1961) afirmam que essa reação é indesejável, pois além de ser um cimento fraco, impede as reações pozolânicas, tendo como consequência uma redução na resistência. Segundo relato do TRB (1976), este é um composto relativamente insolúvel que deve ser evitado através de procedimentos construtivos adequados.

As reações solo-cal também podem ser prejudicadas pela presença de sulfatos no solo. Segundo Sivapullaiah et al. (2000)⁷, citado por Lovato (2004), na presença de sulfatos as reações são modificadas, formando etringita e taumasita, e inibindo a formação dos silicatos e aluminatos hidratados. Para Guimarães (1997), solos com enxofre na forma de gipsita podem produzir $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ (etringita) quando a cal estiver presente, o que afetará de forma negativa o desenvolvimento da resistência.

⁷ SIVAPULLAIAH, P.V.; SRIDHARAN, A.; RAMESH, H. N. Strength behaviour of lime treated soils in the presence of sulphate. **Canadian Geotechnical Journal**, n.37, p. 1358-1367. 2000.

Bhattacharja et al. (2003) afirmaram que a taumasita se forma através da combinação do ataque de sulfatos e da carbonatação. A etringita se transforma em taumasita se houver fontes adequadas de carbonato (CO_3^{2-}) e sulfato (SO_4^{2-}), e a presença de alumina reativa. Segundo os autores, a carbonatação tem um papel importante na desagregação de algumas fases formadas no solo estabilizado. O dióxido de carbono se dissolve na água intersticial do solo estabilizado, produzindo íons carbonato (CO_3^{2-}). A desagregação depende da disponibilidade de carbonato e pode começar com as seguintes fases: formação do CaCO_3 ; conversão de monossulfato e etringita em CaCO_3 ; conversão de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em CaCO_3 ; formação de alumina hidratada e gipsita; e descalcificação do silicato hidratado de cálcio, pela redução da relação Ca/Si.

2.4.5. Ação de cimentação

As reações pozolânicas, formadoras de produtos cristalinos, conferem cimentação aos grãos do solo, ocasionando aumento da resistência mecânica da mistura solo-cal. Essas reações são responsáveis pela cristalização do gel formado na reação de troca catiônica. Segundo Herrin e Mitchell (1961), o produto desta reação é um gel de silicato e aluminato de cálcio, que tende a cimentar as partículas de solo de maneira similar aqueles produzidos pela hidratação do cimento Portland.

Fatores considerados importantes nas reações pozolânicas são: quantidade de cal; condições de cura; e propriedades naturais do solo, tais como: teor de matéria orgânica, características do complexo de troca, carbonatos livre, sulfatos livres, enriquecimento por sódio, quantidade de sílica, alumina, e óxidos de ferro (total ou extraível), teor e plasticidade da fração argila, mineralogia da argila, e pedologia (HARTY, 1973).

Segundo Rogers e Glendinning (2000)⁸, citados por Lovato (2004), os íons hidroxila liberados da cal elevam o pH da mistura a um valor

⁸ ROGERS, C.D.F.; GLENDINNING, S. Lime requirement for stabilization. In: **Transportation Research Board**. 79th Annual Meeting. Washington, D.C. 2000

suficientemente alto, de modo que a sílica e a alumina sejam dissolvidas da argila. Essas reações formarão géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio. De acordo com relato do TRB (1976), esta reação não cessará enquanto houver Ca(OH)_2 reagindo e sílica disponível no solo. Conforme Ingles e Metcalf (1973), os géis de silicato resultantes da reação, imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila bloqueando os vazios. Os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio bem definidos. Os autores salientam que esta reação só ocorre em presença de água, que tem a função de carregar os íons cálcio e hidroxila para a superfície da argila. O mecanismo de reação é resumido e ilustrado na Figura 2.1.

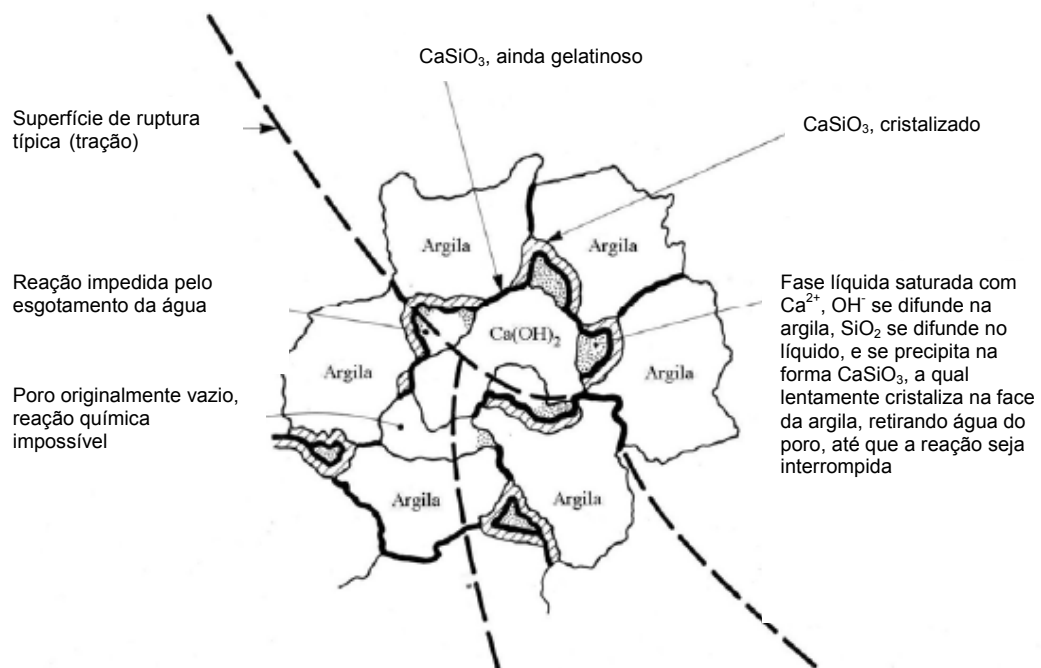
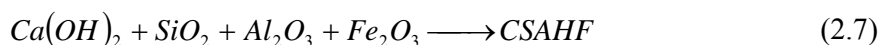
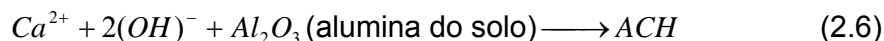


Figura 2.1. Mecanismos de estabilização solo-cal (INGLES e METCALF, 1973).

As reações que se processam, são sumarizadas nas Equações 2.5 a 2.7.



Os produtos SCH e ACH são as formas simplificadas do silicato de cálcio e do aluminato de cálcio hidratados, respectivamente. Tais compostos, principalmente o SCH, são cristais que vão se estendendo e formando estruturas reticuladas que, por meio de seu alto grau de entrelaçamento, promovem a cimentação entre os grãos do solo.

Lima (1981) considera que, de modo geral, todos os solos de granulometria fina reagem com a cal, ocorrendo trocas catiônicas e floculações que afetam, benéficamente, as suas características de trabalhabilidade, plasticidade e caráter expansivo. Contudo, as reações pozolânicas entre os solos e a cal nem sempre ocorrem, sendo influenciadas pelas propriedades naturais dos solos, pelos tipos e teores de cal empregados, pelas condições de cura e pelas características de compactação. Conforme Ingles e Metcalf (1973), pequenos incrementos de cal ao solo, até aproximadamente 2%, são suficientes para promover a completa substituição dos cátions na superfície da argila, mas, ainda insuficientes para desencadear as reações pozolânicas de cimentação entre as partículas.

Barelli (1992) aponta para o fato de que os argilominerais encontrados nos solos são responsáveis pela estabilização. O alto pH criado pela adição da cal promove a quebra da estrutura cristalina dos argilominerais em seu contorno, levando à formação de produtos de reações pozolânicas.

Acerca dos elementos reativos dos solos lateríticos, Nóbrega (1985) aponta como importantes no efeito pozolânico não só o grau de cristalinidade, bem como o tamanho dos constituintes e as associações com outras substâncias (óxidos de ferro e alumínio), as quais podem modificar desfavoravelmente o comportamento dos argilominerais e sua reatividade com a cal. Nos solos lateríticos, a autora apresenta os seguintes elementos como reativos: os produtos amorfos de alumínio e sílica; os hidróxidos de alumínio (gibbsita); os argilominerais caulinita, haloisita, e eventualmente pequenas quantidades de illita e vermiculita. Thompson (1966) aponta que os solos tropicais não se apresentam como os mais favoráveis para a estabilização com a cal, considerando baixa ocorrência de minerais do tipo 2:1, montmorilonita, e as condições de acidez predominantes. Uma análise crítica da influência das propriedades naturais do solo na reatividade a solo-cal pode ser encontrada no trabalho de Lima (1981).

Contraditoriamente, Bauer e Carvalho (1990) apresentam resultados promissores para estabilização de solos lateríticos do Estado da Paraíba, Brasil, assim como sugerem, a partir da utilização da técnica de raios-X, a possível formação de silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio hidratados como compostos predominantes e, possivelmente, cálcio-silicato-aluminato e cálcio-silicato-aluminato de ferro, conforme o tipo de solo.

Lu et al. (1961), sugerem a hipótese de que a alta exotermia de hidratação da cal, possa levar a uma alteração cristalina superficial, melhorando as condições de interface, possibilitando mais fortes ligações do solo à cal, o que levaria a um contato mais íntimo dos grãos.

2.4.6. Alteração de algumas propriedades do solo pela adição da cal

As reações químicas que ocorrem no solo quando se adiciona cal, afetam as propriedades físicas do material, conforme descrito anteriormente no item 2.4.1. Em geral, os solos finos apresentam melhoria na plasticidade, trabalhabilidade e na variação de volume. Porém nem todos os solos

apresentam melhorias na resistência e durabilidade. O tipo de solo, tipo de cal, o teor de cal e o tempo de cura, são algumas variáveis que influem significativamente no comportamento dos solos tratados com cal.

2.4.6.1. Granulometria

Em termos de granulometria, a adição da cal ao solo, de natureza físico-química, proporciona a aglomeração e floculação, por troca catiônica processada nas finíssimas partículas de argila, reativas, gerando modificações granulométricas que combinadas com as alterações verificadas nos limites de consistência se refletem consideravelmente no comportamento dos solos. Nos solos de granulometria grosseira esta influência é muito reduzida.

Para Hilt e Davidson (1960), há certas indicações de que este agregado não é inteiramente resistente à água. Depois de um período embebido em água, uma pequena porção das partículas agregadas tende a desagregar. Contudo, as restantes partículas são bastante hidrófobas e manterão a sua agregação após longos períodos de embebição.

Osula (1996) conduziu uma avaliação para comparar o desempenho da cal e cimento em um solo laterítico, considerando o tempo de descanso entre a mistura e a realização do ensaio. Comparativamente a cal se mostrou efetiva na floculação das partículas de argilas, sendo que a modificação progrediu com o tempo decorrido entre mistura e elaboração dos ensaios.

2.4.6.2. Plasticidade

O grau em que a plasticidade é afetada depende de vários fatores, dentre os quais se destacam: o tipo de solo, o tipo e quantidade de cal e o tempo e as condições de cura da mistura.

Castro e Serafim Luis (1974) relataram reduções no limite de liquidez (LL) e acréscimos no limite de plasticidade (LP) e, conseqüentemente, reduções no índice de plasticidade (IP) dos solos após

adição de cal. Segundo eles, solos com elevado IP mostram-se mais suscetíveis à redução de plasticidade, enquanto aqueles moderadamente plásticos são menos afetados, podendo haver acréscimos no valor do IP.

Em geral, o LL aumenta nos solos menos plásticos e diminui nos mais plásticos, tendo-se verificado reduções de até 80% no IP de argilas altamente plásticas pela adição de pequenos teores de cal (LIMA et al., 1993).

Hilt e Davidson (1960) observaram que o LP de solos argilosos aumenta com a adição da cal. Esse efeito foi mais acentuado em solos contendo montmorilonita, sendo que aqueles contendo caulinita foram menos afetados. Os autores conceituaram, a partir do LP, o chamado ponto de fixação da cal (*LFP-Lime Fixation Point*), que é o teor de cal, até o qual a sua adição contribui para a melhoria da trabalhabilidade do solo, sem produzir aumento de resistência. Esse teor seria o ótimo para atender as modificações da plasticidade, sendo que para teores de cal superiores ao LFP, o solo ganha resistência sem ter sua trabalhabilidade e IP modificados.

Lima et al. (1993) também comentaram que sensíveis reduções do IP, quando ocorrem, processam-se poucas horas após a adição de cal, com ressalva de que toda a variação na plasticidade em geral ocorre no intervalo de dois a três dias. Em concordância, Castro e Serafim Luis (1974) ensaiaram solos de Moçambique, concluindo que o tempo necessário para que se dê redução da plasticidade situou-se, para a cal cálcica nos primeiros dois dias, e para cal dolomítica nos primeiros quatro dias.

Osula (1996) observou que a cal proporciona um imediato melhoramento da plasticidade de um solo laterítico. Quando comparado com o cimento, a cal demonstrou-se duas vezes mais efetiva com o teor de 1% de estabilizante.

Osula (1991)⁹, citado por Attoh-Okine (1995), encontrou que o limite de liquidez reduz com o aumento dos teores de cal, e o limite de plasticidade

⁹ OSULA, D.O.A. Lime modification of problem laterite. **Eng. Geol.** 30:141: 154, 1991.

decrece com a adição de cal. Segundo o referido autor, a redução no limite de liquidez poderia ser resultado das reações de troca que ocasionou a floculação das partículas, redução da fração argila e da superfície específica. O limite de plasticidade aumentou devido à alteração da camada de água que rodeia os minerais de argila.

2.4.6.3. Compactação

Pesquisas têm relatado que misturas solo-cal apresentam menor peso específico aparente seco máximo que o solo natural, para uma mesma energia de compactação. Lima et al. (1993) afirmaram que o peso específico aparente seco máximo continua a cair à medida que aumenta o teor de cal, com reduções que podem atingir valores de 5%. Em contrapartida a esse comportamento a umidade ótima da mistura aumenta com o incremento do teor de cal, notando-se inicialmente significativo acréscimo (2 a 3%) no teor de umidade do solo pela adição de baixos teores de cal.

Osinubi (1998)¹⁰, citado por Lovato 2004, estudou a influência do retardamento da compactação no peso específico aparente seco máximo de misturas solo-cal, constatando uma tendência de diminuição nesse parâmetro à medida que o tempo de espera entre a mistura e a compactação aumenta. O autor observou também uma redução na umidade ótima da mistura com a espera na compactação, o que pode ser atribuído às trocas catiônicas e a floculação das partículas de argila, que ocorrem simultaneamente, deste modo diminuindo a água disponível no sistema. Segundo o autor, em materiais compactados imediatamente após a mistura, a mudança nas características de compactação é principalmente devida à alteração na granulometria do solo; quando ocorre uma demora na compactação, os produtos de hidratação se unem às partículas tornando

¹⁰ OSINUBI, K. J. Influence of compactive efforts and compaction delays on lime-treated soil. **Journal of Transportation Engineering**. March/April. 1998.

necessária à ruptura dessas agregações para que o solo seja compactado satisfatoriamente, o que pode não recuperar sua total resistência.

Mitchell e Hooper (1961) pesquisaram o efeito do tempo de espera entre mistura e compactação em um solo orgânico argiloso. Verificaram que a espera de 24 horas reduz a densidade em relação à amostra compactada imediatamente após a mistura. Segundo os autores, a principal causa deste comportamento é a floculação do material, que aumenta com o passar do tempo. Na prática, o tempo de espera entre mistura e compactação, melhora a distribuição da umidade e as características de manuseio do material, podendo se justificar uma perda de densidade. Por outro lado, a adoção de uma energia de compactação maior, pode ser utilizada para recuperar a redução da densidade.

Bell (1996) relata que no tratamento de solos caulíníticos são obtidos valores maiores do peso específico aparente seco, do que em solos onde há a presença de argilo-minerais expansivos.

Quanto ao tipo de cal, tem-se que os solos estabilizados com cal viva apresentam, em geral, uma umidade ótima ligeiramente mais elevada do que aqueles tratados com cal hidratada, para uma mesma energia de compactação. No que se refere ao peso específico seco, o tipo de cal parece não exercer influência significativa (LIMA et al, 1993).

2.4.6.4. Resistência mecânica

Ao contrário de muitos outros estabilizantes, não há um teor ótimo de cal que produza uma resistência máxima do solo sob todas condições (HERRIN e MITCHELL, 1961). O desenvolvimento da resistência de misturas solo-cal depende de diversas variáveis, como: tipos de solo e cal, teor de cal, tempo e temperatura de cura (TRB, 1976).

Bell (1996) constatou um rápido aumento inicial na resistência à compressão simples de um solo contendo montmorilonita, com pequenos teores de cal (2% a 3%). Além disso, para este solo, 4% de cal foi suficiente para atingir a resistência máxima, enquanto que para um solo rico em

caulinita, a resistência máxima foi atingida com teores entre 4% e 6%. Entretanto, o nível de resistência alcançado pela mistura solo caulinítico com cal foi sensivelmente superior ao do solo montmorilonítico. O autor constatou, também, que a resistência não aumenta linearmente com o teor de cal, e a cal em excesso diminui a resistência.

Com relação à influência do tipo de cal na resistência mecânica de misturas solo-cal, em nível internacional, pode-se citar os trabalhos de Lu et al. (1961), com um estudo de laboratório, em que analisaram os efeitos de várias cales sobre a resistência mecânica de diversos solos, concluindo a respeito do desempenho superior das cales dolomíticas sobre as cálcicas, em especial para teores de cal superiores a 4%. Vale destacar que Mendonça (1998), também, obteve melhor desempenho de uma cal dolomítica comercial em relação a uma cálcica comercial, analisando o parâmetro resistência à compressão não-confinada de misturas solo-cal produzidas com um solo residual maduro e com um solo residual jovem da Zona da Mata Norte de Minas Gerais.

Com relação ao tempo de cura, de modo geral, a resistência dos solos estabilizados com cal aumenta com a idade de modo semelhante a solos estabilizados com cimento Portland, porém, as misturas solo-cal não ganham resistência com a mesma velocidade. Há um rápido aumento de resistência das misturas solo-cal no começo do período de cura, mas, à medida que a cura progride a velocidade do aumento de resistência torna-se cada vez menor. Alguns trabalhos têm demonstrado que a resistência de misturas solo-cal continuava a aumentar depois de 4 anos de cura controlada em laboratório (HERRIN e MITCHELL, 1961).

Mendonça et al. (1996) estudaram a estabilização de dois solos da região de Viçosa-MG utilizando a cal como estabilizador e a temperatura como agente de cura acelerada, e concluíram que a atividade pozolânica entre a cal e o solo, está ligada à temperatura de cura. Quando curada à baixa temperatura, o aumento na resistência mecânica das misturas é pequeno, ao passo que, para temperaturas mais elevadas, essas resistências evoluem com extrema rapidez. Com relação à influência do

tempo de cura, há constatações de que há limite para ganho de resistência com a evolução do tempo e temperatura de cura.

A presença de matéria orgânica também influencia o processo de estabilização, retardando as reações, e produzindo pequenos ganhos de resistência. Thompson (1964) afirmou que um solo com teor de matéria orgânica maior que 1% não responderia à estabilização, embora Arman e Munfak (1970) tenham conseguido bons resultados na estabilização solo-cal, trabalhando com solos orgânicos de Louisiana, EUA.

2.4.6.5. Expansão

A expansão e a contração de um solo são normalmente reduzidas quando o mesmo é tratado com cal. A diminuição da expansão é atribuída à redução da afinidade por água das argilas saturadas pelo íon cálcio e pela formação de uma matriz de cimentação (TRB, 1976).

Valores de expansão medida no ensaio CBR em solos tratados com cal variam, mas é comum se observar reduções na expansão para menos de 0,1%, em comparação com 7% a 8% do solo não tratado (TRB, 1976). Cardoso (1994), trabalhando com solos oriundos de camadas superficiais areno-argilosas das encostas de Viçosa-MG, Brasil, obteve reduções na expansibilidade LNEC de até 80%. Segundo Castro e Serafim Luis (1974), também, tem sido referenciada como de pequena importância a contração dos solos estabilizados devido à perda de umidade.

2.5. ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS COM USO DE CIMENTO

A estabilização solo-cimento é o produto da mistura homogênea de solo, cimento e água, em proporções adequadas que, após compactação e cura úmida, resulta num produto com características mínimas exigidas de resistência mecânica e durabilidade (ABCP, 1986).

A aplicação desse material em pavimentos, no Brasil, teve início em 1940, influenciada pelas experiências bem sucedidas nos Estados Unidos,

onde o solo-cimento era utilizado, principalmente, na área de pavimentação (BNH, 1983). A partir de então, a estabilização solo-cimento tem sido estudada no Brasil e em outros países, podendo citar algumas referências como Ingles e Metcalf (1973), ABCP (1986), Lima et al. (1993), Trindade et al. (2003).

O efeito produzido pelo cimento pode ser visto de duas formas distintas, conforme se refira aos solos granulares ou aos solos coesivos. Nos primeiros, o aditivo destina-se, principalmente, a criar ligações nos contatos intergranulares, de modo a garantir resistência mecânica mais efetiva do material às solicitações externas, por aumento da parcela resistente relativa à coesão; no caso dos solos finos, os grãos de cimento comportam-se como núcleos, aos quais aderem pequeníssimas partículas que os rodeiam, formando regiões de materiais floculados que apresentam ligações oriundas dos fenômenos de cimentação.

2.5.1. O cimento

A especificação brasileira EB-1/ 91 da ABNT define o cimento Portland comum como o aglomerante hidráulico obtido da moagem do clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a moagem, a quantidade necessária de sulfato de cálcio (gesso), com a finalidade de regular o início da hidratação ou o tempo inicial de “pega”. Durante a operação de moagem dessa mistura, permite-se, também, a adição de materiais pozolânicos, de escórias granuladas de alto-forno e, ou, de materiais carbonáticos, nos teores de 1 a 5%, em relação à massa total do aglomerante.

O processo de fabricação do cimento Portland consiste, de maneira sucinta, em moer a matéria-prima, misturá-la em determinadas proporções e submetê-la à queima em forno rotativo a elevadas temperaturas. O produto obtido na queima é o clínquer que é finamente moído. Para controlar a pega e o endurecimento, é acrescentado o gesso. Esse material pode receber outras adições posteriormente, como a escória de alto forno, as cinzas volantes, as sílicas ativas, etc (NEVILLE, 1997).

A composição química específica e propriedades físicas de cimento contem basicamente uma série de compostos anidros, dos quais os principais são:

- silicato tricálcico, ou alita ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$);
- silicato dicálcico, ou belita ($2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$);
- aluminato tricálcico ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$);
- ferroaluminato tetracálcico, ou ferrita ($4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$).

Metha e Monteiro (1994) destacam a composição potencial em faixas aproximadas dos componentes básicos do cimento Portland, como se observa na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Componentes básicos do cimento Portland (METHA & MONTEIRO, 1994)

Componente	Proporção (%)
$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	35 a 65
$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	10 a 40
$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	0 a 15
$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	5 a 15

O conhecimento dos produtos formados pela hidratação do cimento, bem como dos diversos fatores (calor liberado e velocidade) que constituem essa reação, é de grande importância para o uso prático do cimento Portland. De fato, por se tratar de um componente do solo-cimento, é preciso compreender algumas características tecnológicas desse material.

Segundo Metha e Monteiro (1994), as propriedades dos componentes principais do cimento em hidratação são as seguintes:

- $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ – reage nos primeiros minutos e ocasiona elevado calor de hidratação, bem como propicia pouco desenvolvimento de resistência e forte retração;

- $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ – responsável pelo desenvolvimento de resistência nas idades iniciais e propicia alto despreendimento de calor e libera cerca de 40% em massa de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$);

- $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ – proporciona o desenvolvimento de resistência em idades mais avançadas com baixa liberação de calor e produz cerca de 18% em massa de hidróxido de cálcio;

- $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ – desenvolvimento lento e pequeno de resistência mecânica e boa resistência ao ataque por sulfatos.

O processo de hidratação do cimento é bastante complexo e representado por várias reações químicas simultâneas e que interferem umas nas outras. É fato, ainda, que o comportamento da hidratação (velocidade, distribuição e formação dos produtos hidratados) é função do tamanho dos grãos do cimento (área específica), temperatura, quantidade de água disponível e procedimentos de mistura.

Segundo Mehta & Monteiro (1994), as quatro principais fases sólidas presentes na pasta de cimento são as seguintes:

- a fase silicato de cálcio hidratado ($\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$), produzido pela hidratação do $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ e do $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, que constitui, em geral, de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta e é responsável pela resistência mecânica e, conseqüentemente, pela durabilidade da matriz de concretos e argamassas;

- a fase hidróxido de cálcio, também liberado na hidratação do $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ e $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, representando de 20% a 25% do volume de sólidos da pasta, porém, sua presença tem efeitos desfavoráveis à durabilidade, devido à sua solubilidade;

- os sulfoaluminatos de cálcio, resultantes da hidratação do $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ e do $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ na presença do sulfato de cálcio (gipsita) ou gesso. Ocupa de 15% a 20% do referido volume e tem papel menor na estrutura/propriedade; grãos de clínquer não hidratado.

2.5.2. Mecanismo de reação solo-cimento

Os minerais argilosos são muito afetados nas suas propriedades quando os solos são estabilizados com cimento. Numa primeira fase ocorrem fenômenos de superfície que não alteram a estrutura desses minerais, mas na segunda fase, processada em períodos mais longos, a estrutura sofre modificações que dão lugar a novos produtos. Para maior clareza do assunto, as ações ocasionadas pelo cimento serão separadas em duas classes: a dos efeitos a curto prazo, que predominam no início da estabilização, e a dos efeitos a longo prazo, importantes quando o solo já está estabilizado.

2.5.3. Efeitos a curto prazo

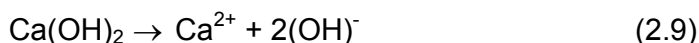
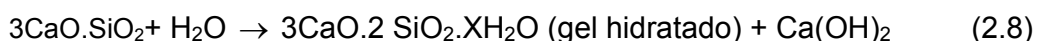
O mecanismo de reação da mistura solo-cimento começa com as reações dos constituintes anidros do cimento que, quando em presença de quantidade suficiente de água, hidratam e endurecem em virtude de processos químicos por si só bastante complexos. Durante a hidratação dos constituintes anidros do cimento, segundo Moh (1962), há liberação da cal (hidróxido de cal) que geralmente reage com os componentes químicos da parte do solo não inerte, havendo inclusive alteração de pH e dos componentes químicos já anteriormente formados pela hidratação do cimento.

O hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do clínquer do cimento Portland, tem sobre os solos argilosos um efeito rápido e bem definido, constatado pelas modificações que ocorrem nos solos estabilizados com o uso da cal. Essa melhoria ocasionada pode ser justificada pela ocorrência de fenômenos de troca catiônica, carbonatação, formação de cristais de hidróxido de cálcio e/ou a flocculação.

2.5.4. Efeitos a longo prazo

O processo de estabilização do solo com o cimento é resultante do desenvolvimento das reações químicas do cimento hidratado, a partir das quais se desenvolvem vínculos químicos entre as superfícies dos grãos de cimento e as partículas de solo que estão em contato com o mesmo.

Segundo Moh (1962), em uma mistura solo-cimento, as reações podem ser representadas pelas equações qualitativas, apresentadas nas Equações 2.8. e 2.9, evidenciando, apenas, as reações que envolvem o silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), por ser este o constituinte de maior atuação do cimento:



O silicato de cálcio hidratado ($3\text{CaO} \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$) é assumido como sendo o produto final da hidratação tanto do $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ como do $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Segundo Pitta et al. (1988)¹¹, o silicato originado do $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ é estável somente quando em contato com soluções pozolânicas, cujos produtos endurecem em uma velocidade bem mais lenta (FERRAZ, 1994).

Apesar de nos solos argilosos ocorrer à formação de dois tipos de compostos cimentantes, observa-se que solos de características arenosas respondem melhor à estabilização com cimento. Segundo Croft (1968)¹², esse fato ocorre porque, com a adição de cimento ao solo, os minerais argilosos do mesmo, ao reagirem com a cal formada na hidratação dos compostos do cimento, ocasionam uma queda no pH da mistura, que afeta a hidratação e o endurecimento do cimento (FERRAZ, 1994).

¹¹ PITTA, M.R.; CARVALHO, M. D.; RODRIGUES, P. P. F. **Materiais para pavimentação de concreto simples**. 2. ed. Ver. Atual., São Paulo, ABCP, 172p, 1988. (Estudo técnico, 47).

¹² CROFT, J. B. The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. **Geotechnique**, 17: 119-135, 1967.

É preciso lembrar que em uma solução de baixo pH, existe a tendência do $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{XH}_2\text{O}$ formado reagir novamente e originar o composto C e cal. Assim, tem-se a formação do silicato de cálcio hidratado $\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$, com o consumo de parte do $3\text{CaO}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{XH}_2\text{O}$ formado, que é o composto responsável pela maior parte da resistência da mistura solo-cimento. O CSH é benéfico se for formado a partir das reações da cal com as partículas do solo e sua presença torna-se indesejável quando o mesmo se origina do $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{XH}_2\text{O}$. Por isto, à medida que os solos tornam-se mais finos (mais argilosos e reativos com a cal), a contribuição para o desenvolvimento da resistência para agregação das partículas, resultante das reações pozolânicas, se dá em virtude de um decréscimo de contribuição da matriz cimentante. Conseqüentemente, uma mesma quantidade de cimento resultará em uma resistência mais elevada em solos de características arenosas, do que em solos predominantemente argilosos. Assim, na mistura solo-cimento, a cimentação obtida deve-se, principalmente, ao endurecimento das partículas de cimento Portland, resultante de sua hidratação, e também em função do endurecimento dos produtos da reação pozolânica, que ocorre entre a cal e as partículas do solo. Quanto à contribuição na resistência final da mistura, as reações de hidratação do cimento são as mais importantes e respondem pela maior parte da resistência final alcançada (SILVA, 1968).

Um dos fatores de grande importância na estabilização solo-cimento é a presença de sulfatos no solo, pois de acordo com Petrucci (1998), os sulfatos podem reagir com o hidróxido de cálcio e a alumina livre do cimento, formando o sulfo-aluminato de cálcio, de natureza expansiva, podendo até inviabilizar o uso do cimento como estabilizante químico em estradas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentam-se os materiais utilizados para o desenvolvimento dessa pesquisa, bem como a metodologia para a realização do programa experimental.

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Solos

O trabalho foi conduzido com dois solos residuais de gnaiss, sendo um solo residual maduro, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, aqui denominado solo 1, e um solo residual jovem, aqui denominado solo 2. Esses materiais representam solos característicos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brasil, em especial da microrregião de Viçosa. O solo 1 apresenta evolução pedológica avançada e é de ocorrência nas encostas mais suavizadas no horizonte B do perfil. Este tipo de solo abrange uma área significativa do território brasileiro, em especial da Região Sudeste. Nele predomina a composição mineralógica presente nos argilominerais 1:1 e óxidos de ferro e alumínio.

O solo 2, saprolítico, é essencialmente quartzoso, com horizonte C profundo. Apresenta como particularidade de interesse uma composição granulométrica que se enquadra na faixa recomendada para misturas densas ("n" no intervalo de 0,4 a 0,6) pela equação de Fuller-Talbot, como destacam Lima et al. (1993). Refere-se, também, que este material enquadra-se nas exigências granulométricas da Norma NB 1336 (ABNT, 1990), para a dosagem de camadas de base solo-cimento de pavimentos rodoviários.

Apresenta-se, a seguir, uma descrição dos solos e dos locais de coleta de suas amostras, bem como, na Figura 3.1, fotografias ilustrativas destes materiais.

- solo 1: é um solo residual maduro, com horizonte B latossólico de tonalidade amarelada, estrutura granular forte, aspecto visual poroso, com textura argilo-areno-siltosa. Segundo Trindade (2006) na fração argila desse solo predominam os minerais caulinita e goethita, embora sejam encontrados também traços de gibbsita. Segundo esse autor, quando compactado tem a tendência à coalescência dos microagregados, resultando em uma estrutura altamente coesa e compacta, destacando-se que o esforço de compactação resulta no aparecimento de fissuras ao longo de linhas de fraqueza, formando estruturas fraturadas preenchidas por plasma argiloso. O local de coleta da amostra foi um talude de corte localizado no Campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV);
- solo 2: é um solo residual jovem oriundo de um perfil de intemperismo desenvolvido de gnaiss do Pré-Cambriano, que apresenta coloração acinzentada, com textura areno-silto-argilosa. Segundo Trindade (2006) suas frações areia e silte são constituídas basicamente de quartzo, mica e feldspato, além de pseudomorfos de mica e caulinita. Na sua fração argila, predomina a caulinita, com traços de goethita, bem como apresenta uma estrutura grânica ponteadada (*bridge structure*, ou seja, com “pontes” argilosas ligando os grãos) envolvida em plasma escasso. Como destaca Azevedo (1999), esse solo apresenta, também, pseudomorfos caulíníficos os quais quando submetidos ao esforço de compactação são reorientados formando linhas paralelas normais à direção de aplicação do esforço de compactação. A amostra foi coletada em um talude de corte localizado na Vila Secundino, no Campus da UFV.



(a) Solo 1



(b) Solo 2

Figura 3.1. Fotografias ilustrativas dos solos e dos locais de coleta das amostras.

Nas Tabelas 3.1 e 3.2, encontram-se, respectivamente, informações sobre a distribuição granulométrica, os limites de Atterberg e peso específico dos grãos, as classificações dos dois solos, segundo os Sistemas TRB (*Transportation Research Board*), USC (*Unified Soil Classification*) e a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado e Tropical) preconizada por Nogami e Villibor (1995), realizada por Trindade (2006). Na Figura 3.2 apresentam-se as curvas de distribuição granulométrica para os solos 1 e 2.

Tabela 3.1. Características geotécnicas e classificações TRB e USC dos solos

Propriedades analisadas	Designação das amostras	
	Solo1	Solo 2
Argila ($\Phi \leq 0,002$ mm)	66	7
Silte ($0,002 < \Phi \leq 0,06$ mm)	6	22
Areia fina ($0,06 < \Phi \leq 0,2$ mm)	13	33
Areia média ($0,2 < \Phi \leq 0,6$ mm)	13	34
Areia grossa ($0,6 < \Phi \leq 2$ mm)	2	4
Pedregulho ($\Phi > 2$ mm)	0	0
LL (%)	69,5	25
LP (%)	40,9	16
IP (%)	28,6	9
γ_s (kN/m ³)	27,25	25,3
Classificação TRB	A-7-5 (20)	A-2-4 (0)
Classificação USC	CH	SC

LL – Limite de liquidez, LP – Limite de plasticidade, IP – Índice de plasticidade, γ_s – peso específico dos sólidos

Tabela 3.2. Índices classificatórios e classificação MCT dos solos (TRINDADE, 2006)

Designação das amostras	Índice c'	Índice d'	Pi' (%)	Índice e'	Classificação MCT
Solo 1	1,95	103,15	0	0,58	LG'
Solo 2	1,22	31,28	125	1,25	NA'

Pi' – perda de massa por imersão

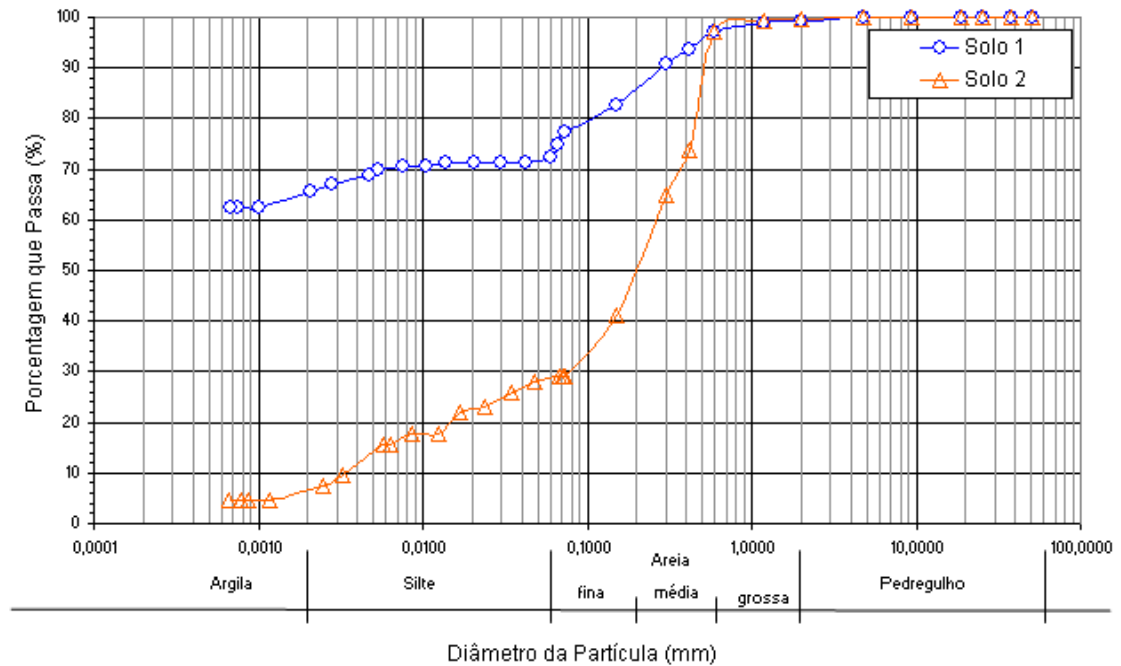


Figura 3.2. Curvas de distribuição granulométrica para os solos 1 e 2.

3.1.2. Aditivos químicos

Foram utilizados no presente estudo produtos comerciais, englobando: um cimento Portland do tipo CII-E-32, da marca Campeão; e uma cal hidratada do tipo CH-III, fabricada pela Indústria de Calcinação S.A. (ICAL). Esses produtos foram caracterizados em laboratório, respectivamente, por Ferraz (1994) e Mendonça (1998), como se ilustra nas Tabelas 3.3.e 3.4.

Tabela 3.3. Composição química do cimento utilizado (FERRAZ, 1994)

Componente	teor (%)
SiO ₂	21,87
Al ₂ O ₃	5,65
Fe ₂ O ₃	3,22
CaO	57,29
MgO	2,68
SO ₃	2,89
K ₂ O	0,71
Cal livre	1,57

Tabela 3.4. Composição química da cal utilizada (MENDONÇA, 1998)

Componente	teor (%)
CaO	74,0
MgO	0,7
SiO ₂	1,5
Perda por calcinação	22,0
CaO disponível	70,0
Ca(OH) ₂ disponível	92,0
CaO na base não volátil	92,0
CaO não-hidratado máximo	1,0
Umidade em excesso máxima	1,0

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Programa experimental

O programa experimental desenvolvido foi efetuado em três etapas, como segue:

- etapa 1, que abrangeu a caracterização dos solos, com a determinação dos seus atributos físicos e mecânicos, como descrito a seguir:
 - ensaios de caracterização geotécnica, englobando as determinações de limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP),

com três repetições, e granulometria com sedimentação, com uma repetição;

- ensaios de compactação realizados na energia do ensaio Proctor intermediário, para definição dos parâmetros ótimos de compactação de cada solo (peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótima (w_{ot}). Destaca-se que a opção pelo uso da energia do Proctor intermediário busca representar condições de emprego dos solos melhorados com cimento e com cal em trabalhos de pavimentação rodoviária, nas funções de melhoria do subleito, reforço, sub-base e, se aplicável tecnicamente, base;
- ensaios de compressão não-confinada realizados em corpos-de-prova moldados nos parâmetros ótimos de compactação relativos à energia do ensaio Proctor intermediário, considerando-se três repetições.
- Etapa 2, que englobou os ensaios de caracterização geotécnica e mecânica dos solos melhorados com cimento e com cal, como segue:
 - ensaios de caracterização geotécnica (LL, LP e granulometria), considerando-se três repetições e os períodos de descanso entre mistura e ensaio de 0, 1, 2, 4 e 8 horas, buscando-se reproduzir possíveis situações de campo, e os teores de estabilizantes de 1, 2 e 3% em relação ou peso de solo seco;
 - ensaios de compactação realizados na energia do ensaio Proctor intermediário, para definição dos parâmetros ótimos de compactação das misturas solo-cimento e solo-cal, considerando-se os períodos de descanso entre mistura e compactação de 0, 1, 2, 4 e 8 horas, para os teores de 1, 2 e 3%;
 - ensaios de compressão não-confinada realizados em corpos-de-prova das misturas moldados nos parâmetros ótimos de compactação da energia do ensaio Proctor intermediário,

considerando-se três repetições, teores de estabilizantes de 1, 2 e 3% e obedecendo-se aos períodos de cura de 7 e 28 dias. Justifica-se a adoção desses períodos de cura das misturas, pois é comum se adotar no dimensionamento estrutural de misturas solo-cimento e solo-cal, respectivamente, os períodos de cura de 7 e 28 dias, como destacam Ferraz (1994) e DNER (1994a), para misturas solo-cimento, e TRB (1976) e Lima (1981), para misturas solo-cal.

- Etapa 3, direcionada ao estudo da influência dos mecanismos de reação do cimento e da cal na resposta dos solos após compactados, abrangendo as caracterizações química e mineralógica de corpos-de-prova moldados nos períodos de descanso ótimos entre mistura e ensaio determinados pelo período que demonstrou maior resistência, para cada teor avaliado:
 - caracterização mineralógica dos solos e misturas, via difratometria de raios-X, para determinação da presença dos seus componentes e a formação de minerais cristalizados; ataque seqüencial com três extratores: BaCl₂, oxalato de amônio e NaOH, com a finalidade de se verificar e/ou quantificar a possível formação de minerais na fase amorfa;
 - caracterização química dos solos e misturas, englobando a determinação de pH em H₂O e KCl, adotando-se a relação 1:2,5 (volume/volume) solo:solução, a determinação da capacidade de troca catiônica (CTC), a determinação da soma de bases trocáveis (SB), a determinação da saturação de bases (V%) dos solos e misturas, bem como a estimativa das alterações no ponto de carga zero (PCZ), de modo a se inferir sobre o possível desenvolvimento de reações pozolânicas.

O resumo do programa experimental segue ilustrado no fluxograma apresentado Figura 3.3.

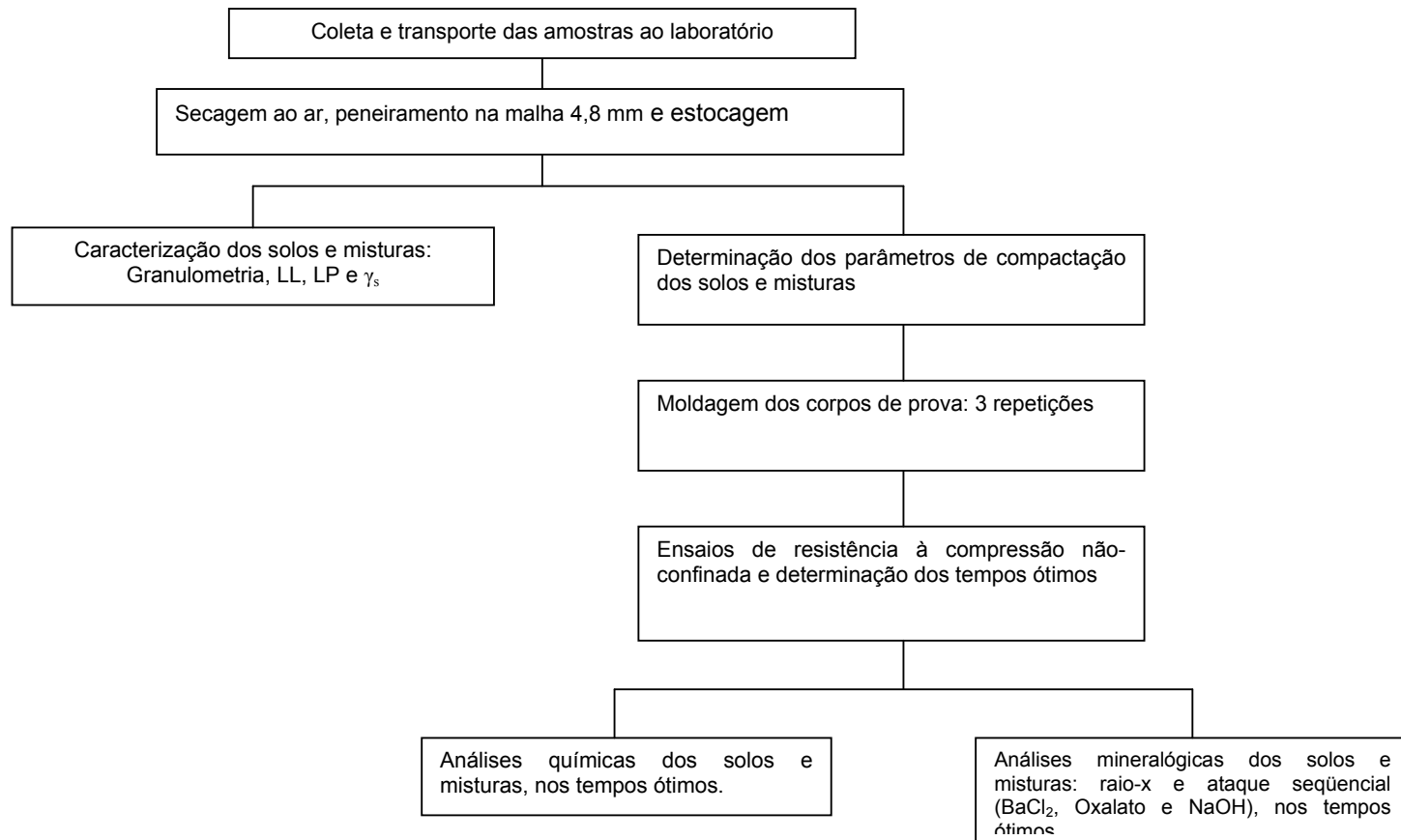


Figura 3.3. Fluxograma do programa experimental.

3.2.2. Preparação das amostras

Os solos utilizados na presente pesquisa foram coletados com auxílio de pás e enxadas, tomando-se o cuidado de evitar a coleta de materiais contaminados por matéria orgânica. Depois de retirados dos taludes de corte, os solos foram armazenados em sacos plásticos com capacidade de até 50 kg para o transporte até o Laboratório de Engenharia Civil (LEC). O material foi destorroado, homogeneizado, quarteado, passado na peneira nº 4 (4,8mm), e armazenado, inicialmente, em barris. Antes de se iniciar qualquer ensaio, as amostras de solos foram deixadas secar ao ar. Os procedimentos empregados para a preparação das amostras para a realização dos ensaios de compactação e caracterização obedeceram à NBR 6457 (ABNT, 1986_a).

3.2.3. Preparação das misturas

As amostras na umidade higroscópica foram separadas em sacos plásticos devidamente isolados para evitar qualquer alteração no teor de umidade, e homogeneizadas. Todo material empregado foi pesado em balança com precisão de 0,01 g. Utilizando-se os teores de 1%, 2% e 3% de cal e de cimento, em relação à massa seca de solo, que foram adicionados e homogeneizados nas amostras ensacadas. Posteriormente, deixaram-se as misturas descansarem por períodos de 0, 1, 2, 4 e 8 horas, até a realização dos ensaios de compactação e caracterização, buscando-se reproduzir possíveis situações de campo. No momento da elaboração dos ensaios adicionou-se água até a umidade ótima de compactação de cada solo.

3.2.4. Análise Granulométrica e Peso específico dos grãos

As análises granulométricas dos solos e das misturas foram realizadas de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984_a). Foram realizadas

análises por peneiramento e sedimentação com o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio.

Os pesos específicos dos grãos dos solos e misturas foram determinadas segundo o procedimento descrito pela NBR 6508 (1984_d).

3.2.5. Limites de Atterberg

Os limites de liquidez (LL) dos solos e misturas foram determinados de acordo com a NBR 6459 (1984_b) e os limites de plasticidade (LP) de acordo com o procedimento descrito na NBR 7180 (1984_c).

3.2.6. Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados na energia do ensaio Proctor intermediário, segundo metodologia descrita na NBR 7182 (ABNT, 1986_b), para determinação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótica (w_{ot}) dos solos e das misturas.

3.2.7. Moldagem dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios de compressão não-confinada

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de compressão não-confinada foram moldados nos parâmetros ótimos (w_{ot} e $\gamma_{dm\acute{a}x}$) da energia de compactação do ensaio Proctor intermediário. Os corpos-de-prova foram compactados por processo dinâmico em três camadas iguais, aplicando-se 21 golpes com um soquete de massa igual a 4,536 kg e altura de queda de 45,72 cm em cada camada e utilizando-se o molde do ensaio de compactação Proctor, ou seja, um molde cilíndrico de 10,00 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura (aproximadamente, 1000 cm³ de volume). Para aceitação dos corpos-de-prova foram fixados os seguintes limites em sua preparação (DNER, 1994_b): peso específico aparente seco máximo $\pm 0,30$ kN/m³ e umidade ótica $\pm 0,5\%$.

3.2.8. Ensaios de compressão não-confinada

Os ensaios de compressão não-confinada foram realizados conforme a metodologia descrita no Método de Ensaio DNER-ME 201 (DNER, 1994_a). Para execução desses ensaios, considerou-se a energia de compactação do ensaio Proctor intermediário, os períodos de cura em câmara úmida de 7 e 28 dias e os teores de aditivo químico de 1%, 2% e 3% em relação ao peso de solo seco. A determinação da resistência à compressão não-confinada foi realizada pela média das tensões de ruptura de três corpos-de-prova, admitindo-se uma tolerância de $\pm 10\%$ em torno da média. Nos casos em que o desvio-padrão superou o valor pré-estabelecido, procedeu-se à moldagem e execução do ensaio de outros três corpos-de-prova, aumentando-se, assim, o número de amostras e, conseqüentemente, a confiabilidade dos resultados.

3.2.9. Caracterização química

As análises químicas dos solos e misturas foram realizadas de acordo com os procedimentos preconizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997). Foram considerados valores de três determinações para cada amostra. O pH em H₂O e KCl (1 mol/L) foi determinado potenciométricamente, na suspensão solo:solução de 1:2,5 (volume/ volume), com tempo de contato mínimo de 1 hora e agitação da suspensão antes da leitura. Os cátions trocáveis Ca²⁺ e Mg²⁺ foram extraídos em KCl 1 mol/L, na proporção 1:20, e determinados utilizando-se um espectrofotômetro de absorção atômica. O cátion Al³⁺, extraído em KCl 1 mol/L, na proporção 1:20, determinado por titulação com NaOH 0,025 mol/L. A acidez potencial ou extraível (H⁺ + Al³⁺) foi extraída com solução de acetato de cálcio 0,5 mol/L, ajustada a pH 7,0, e determinada por titulação com NaOH 0,025 mol/L. Os cátions K⁺ e Na⁺, foram extraídos por solução Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama. Foi utilizada uma estimativa do Ponto de Carga Zero (PCZ), determinada pela diferença do dobro do pH medido em KCl e o pH medido em água. Com o resultado

dessas análises, foi possível determinar: (i) soma de bases trocáveis (SB): $\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na}$; (ii) capacidade de troca catiônica (CTC): $\text{SB} + \text{H} + \text{Al}$; (iii) porcentagem de saturação de bases (V%): $(\text{SB} / \text{CTC}) \times 100$.

As amostras foram obtidas do rompimento dos corpos-de-prova à compressão não-confinada, que depois de rompidos e verificado o tempo que apresentou maior valor de resistência a compressão simples (tempo ótimo) para cada teor de estabilizante. Identificado o tempo ótimo, as amostras foram destorroadas e passadas na peneira número 10 ($\Phi < 2 \text{ mm}$). Posteriormente, esses materiais foram deixados secarem ao ar, homogeneizados e foram separadas amostras de 100 g de solo que foram colocadas em sacos plásticos, para posterior análise química.

3.2.10. Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica dos solos e misturas foi identificada sob dois aspectos. Primeiramente analisou-se a presença da formação de minerais de Si, Al, Ca e Mg na forma amorfa, através de ataque seqüencial por três extratores, a saber: BaCl_2 , oxalato de amônio e NaOH . Posteriormente, avaliou-se a presença de minerais na forma cristalina, identificados por difratometria de raios-X.

As amostras foram obtidas do rompimento dos corpos-de-prova à compressão não-confinada pelo mesmo procedimento realizado para as amostras analisadas quimicamente. Os corpos-de-prova foram destorroados e passados na peneira número 10 ($\Phi < 2 \text{ mm}$), secos em estufa à 105° C , homogeneizados e separados 100 g de solo em sacos plásticos.

O procedimento utilizado para realização do ataque seqüencial obedeceu às seguintes etapas:

- etapa 1- extração do solúvel e trocável com cloreto de bário: Pesou-se 1,0 g de solo (TFSA) e colocou-se em tubo de centrífuga (de 30 ml de capacidade). Adicionou-se 20 mL de BaCl_2 (0,5 mol/L) e agitou-se por 2 horas em agitador mecânico. Centrifugou-se a 2000

rpm por 10 minutos e reteve-se o sobrenadante para posterior determinação, no plasma, dos cátions trocáveis Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Si^{4+} e Al^{3+} . Os dados foram obtidos das médias de três determinações das amostras e duas determinações do branco;

- etapa 2 - determinação de minerais solúveis em oxalato de amônio: Os tubos de centrífuga utilizados, conjuntamente com as amostras da extração anterior, foram envolvidos em papel alumínio, de modo que não houvesse penetração de luz, uma vez que a reação deve se proceder no escuro. Adicionou-se 10 mL da solução “Reagente TAM” (oxalato de amônio 0,2 mol/L + ácido oxálico 0,2 mol/L a pH 3,0) e tampou-se os tubos imediatamente. Colocou-se o conjunto de tubos em um agitador horizontal de modo que ficassem paralelos à direção do movimento, deixando-se agitar por duas horas. Centrifugou-se a 2000 rpm por 10 minutos, reteve-se o extrato e efetuou-se o conjunto de leituras dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Si^{4+} e Al^{3+} no plasma. Os dados foram obtidos das médias de três determinações das amostras e de duas determinações do branco;
- etapa 3 - determinação de amorfos: nas amostras dos tubos de centrífuga, adicionou-se 40 mL de NaOH 0,5 mol/L, aqueceu-se em banho maria a 90°C por 15 minutos e depois centrifugou-se. Efetuaram-se leituras (plasma) dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Si^{4+} e Al^{3+} no sobrenadante. Os dados foram obtidos das médias de três determinações das amostras e duas determinações do branco.

A análise mineralógica foi realizada no Laboratório de Mineralogia do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa e consistiu na difração de raios-X, usando tubo de Cobalto, potência de 45kV e corrente de 30 mA, com presença de monocromador de grafite curvo. Todas as amostras foram irradiadas em lâminas de cobalto ($\text{Co-K}\alpha$), com varredura nos intervalos de 4° e 50° 2 θ , usando o difratômetro de raios-X fabricado pela Companhia Rigaku, com velocidade de 2° 2 θ /min. A aquisição dos dados foi realizada automaticamente a cada 0,05° 2 θ . A identificação dos minerais foi realizada na fração silte-argila ($\Phi \leq 0,05$ mm) e na fração areia

($0,05 < \Phi \leq 2$ mm). As amostras da fração areia foram montadas em lâminas de vidro escavadas, usando cola neutra para fixação da amostra, evitando a orientação. Amostras orientadas foram montadas para a fração silte-argila, na lâmina lisa de vidro, pela técnica do esfregaço.

3.2.11. Análise estatística dos dados

A análise estatística dos dados foi realizada através de Análise de Variância – ANOVA (BANZATTO e KRONKA, 2006), para avaliação dos valores das frações granulométricas, índices de plasticidade, parâmetros de compactação, considerando-se os tempos entre mistura e ensaios como repetições. As comparações, nas análises ANOVA, foram realizadas utilizando-se o teste Tukey. Para os valores de resistência a compressão não-confinada foi necessária à utilização de análises fatoriais de variância, uma vez que se dispunha de dois tratamentos. As análises foram realizadas utilizando-se o software STATISTICA 6.0. Destaca-se que foram adotados níveis de probabilidade de 1% e 5% em todas as ANOVAs. O uso do nível de probabilidade 10% foi desconsiderado, uma vez que diminuiria a rigorosidade dos testes aplicados. Para o teste de médias adotou-se o nível de probabilidade de 5%, uma vez que com nível de probabilidade de 1% seria muito rigoroso para os ensaios realizados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo do efeito da cal e cimento na modificação dos solos, buscando vislumbrar mecanismos de reação, foi elaborado com base nos ensaios que caracterizam as misturas nos aspectos físicos, químicos, mecânicos e mineralógicos. As alterações nas propriedades dos solos foram analisadas via ensaios de caracterização geotécnica, compactação e resistência compressão não-confinada. Também, foram incorporados resultados de análises químicas e mineralógicas das misturas, com intuito de se verificar o processo e a formação de novos minerais.

Neste capítulo apresentam-se os resultados do programa experimental, bem como as discussões sobre as tendências de comportamento. Destaca-se que o conjunto dos ensaios realizados englobou os seguintes totais: (i) 62 ensaios de granulometria com sedimentação; (ii) 186 ensaios de LL e LP; (iii) 62 curvas de compactação no Proctor intermediário (310 ensaios); (iv) 372 ensaios de compressão não-confinada; (v) 26 ensaios de caracterização química (pH, SB, V, CTC, etc); e (vi) 26 análises mineralógicas, com determinação de minerais na fase amorfa e cristalina.

4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.1.1. Análise granulométrica

Nas Figuras 4.1 e 4.2, apresentam-se as variações das frações granulométricas do solo 1, ocasionadas pela adição de cal e de cimento, bem como a influência dos tempos decorridos entre mistura e realização dos ensaios de granulometria de 0, 1, 2, 4 e 8 horas.

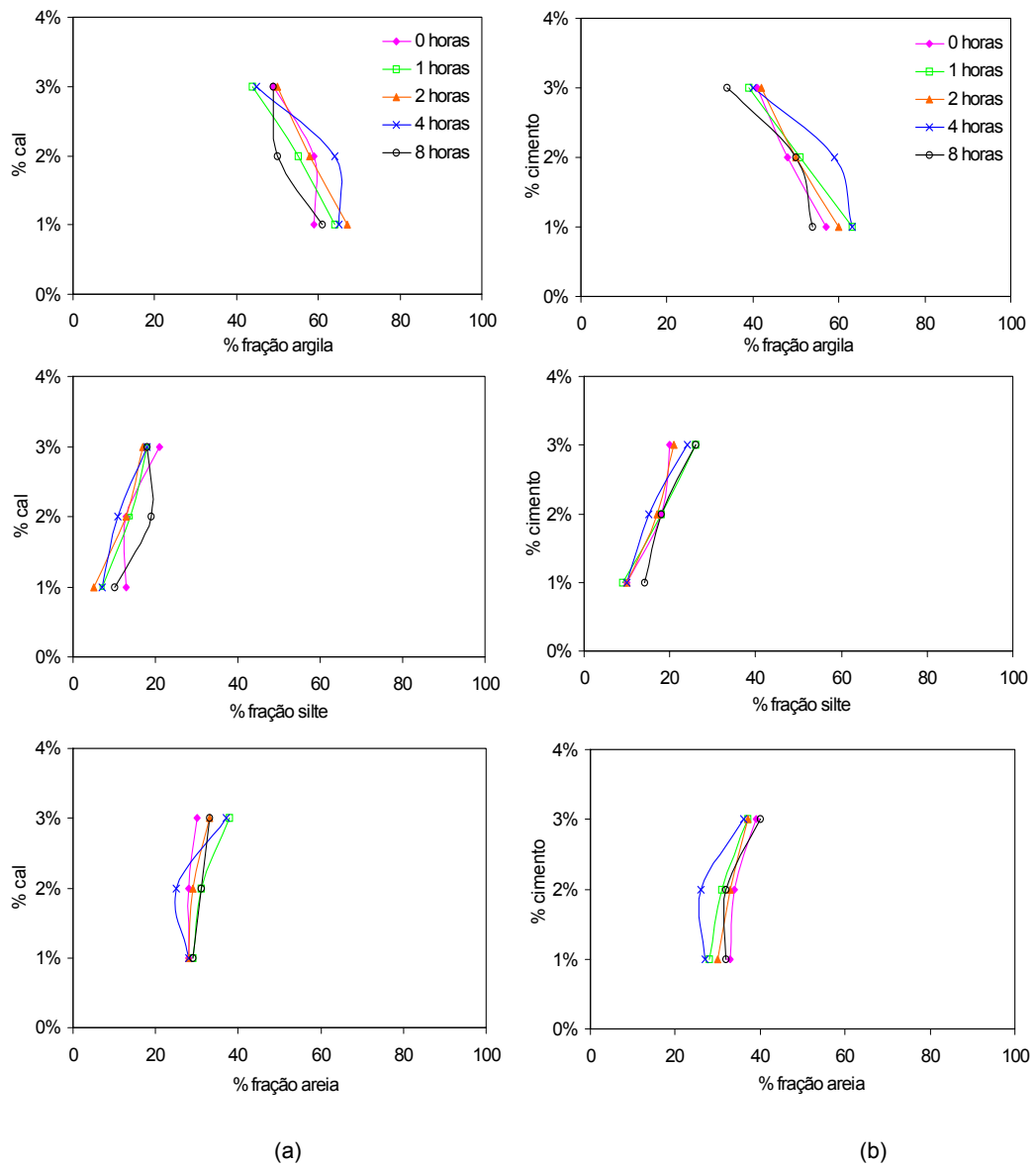


Figura 4.1. Variação das frações granulométricas das misturas solo 1-cal (a) e solo 1-cimento (b), e a influência dos tempos decorridos entre mistura e realização do ensaio de granulometria.

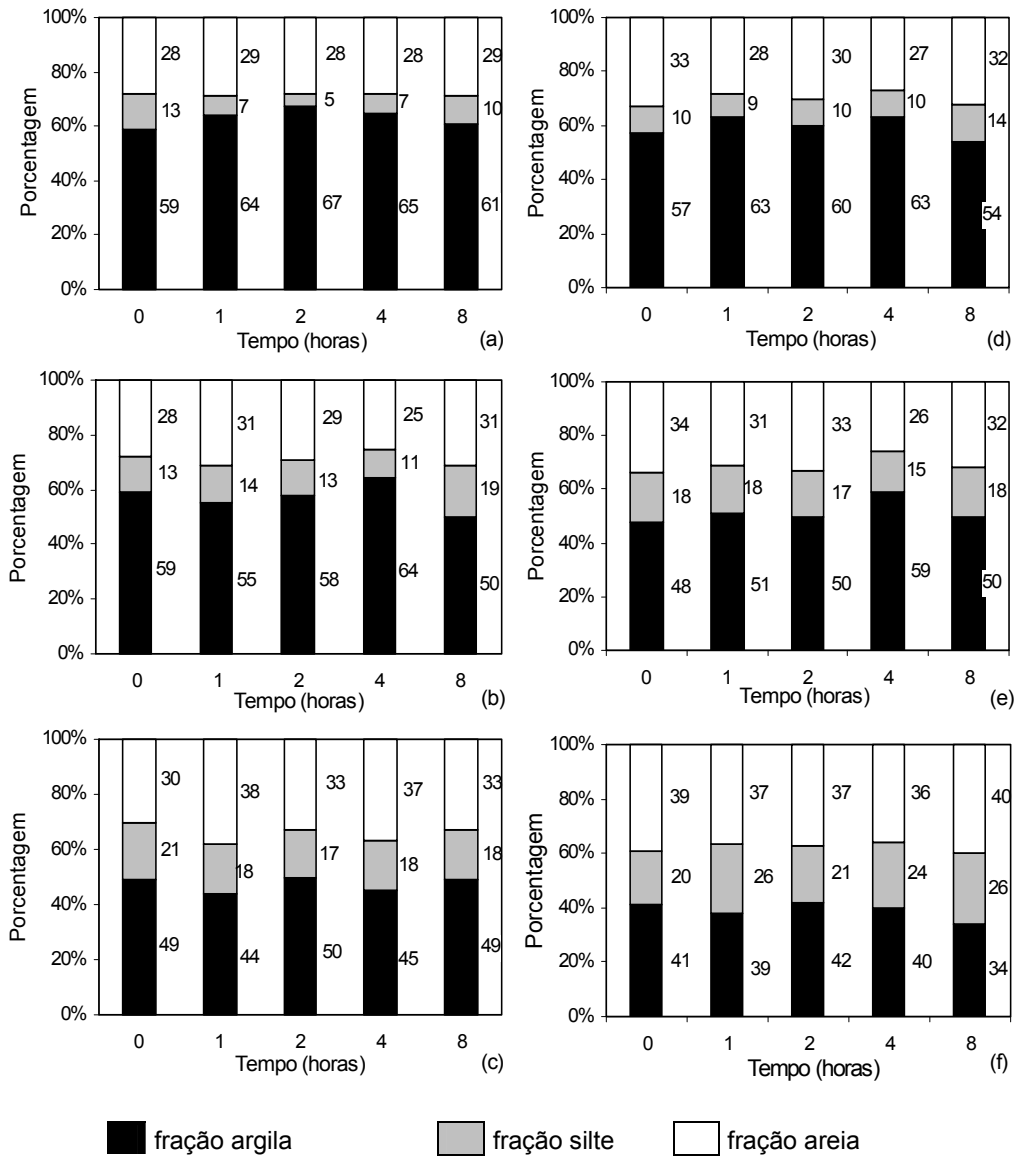


Figura 4.2. Variação das frações granulométricas das misturas solo 1- 1% cal (a), solo 1-2% cal (b), solo 1-3% cal (c), solo 1-1% cimento (d), solo 1-2% cimento (e) e solo 1-3% cimento (f), e a influência dos tempos de descanso entre mistura e a realização do ensaio de granulometria.

Nas Figuras 4.1 e 4.2, notou-se que houve redução da fração argila com o aumento dos teores de cal, o que evidenciou a ocorrência de trocas catiônicas no complexo sortivo do solo, com o íon cálcio exercendo papel preponderante na redução da dupla camada difusa e favorecendo a ocorrência de fenômenos de floculação. Nas misturas solo 1-cal, a influência do tempo de descanso entre mistura e realização do ensaio de granulometria não seguiu a tendência das modificações ocorridas nas frações de solo relatadas por Osula (1996), que verificou aglomerações da partículas de argila crescentes com o tempo; presentemente, ocorrem variações nos tempos de maior floculação para cada teor analisado. Na Figura 4.2(a), pode-se visualizar que para a mistura com 1% de cal, as aglomerações da fração argila resultaram em aumento da fração silte, não havendo alteração na fração areia. À medida que se aumentou o teor de cal, verificou-se a ocorrência de maiores alterações na fração silte e de menores, mas expressivas variações na fração areia, como se ilustra nas Figuras 4.2(b) e 4.2(c). Ocorrência de comportamento similar se observou nas misturas solo-cimento, mas, quantitativamente, notou-se a ocorrência de alterações maiores nas frações argila, silte e areia, o que trouxe à tona a eficiência maior do cimento do que da cal nos mecanismos imediatos de aglomeração, onde provavelmente as reações de cimentação que ocorrem logo nas primeiras horas, conjuntamente com os fenômenos de floculação estão sendo efetivos no presente caso.

Nas Figuras 4.2(d) a 4.2(f), observaram-se, para misturas solo-cimento, que as alterações na fração argila com o tempo entre a mistura e a realização do ensaio, também não apresentaram tendência de variação de comportamento. Notou-se que, nos tempos de 8 horas entre mistura e realização dos ensaios de granulometria, ocorreram maiores alterações nas frações granulométricas, principalmente nas frações argila e silte, em concordância com resultados de Osula (1996). Tal fato pode estar associado com o início das reações de cimentação dos produtos de hidratação do cimento.

Comparativamente com a cal, conclui-se que o cimento mostra-se mais efetivo nas alterações das frações granulométricas do solo 1, principalmente nos teores de 2% e 3% dos estabilizantes, o que pode estar relacionado às reações de troca catiônica associadas a reações de hidratação do cimento responsáveis, também, por alterações mais significativas em prazos mais longos.

Para a análise estatística dos dados obtidos no presente trabalho, lançou-se do uso de análise de variância (ANOVA), e no caso de se verificar alguma variação significativa, efetuou-se um teste de médias (teste tukey), convencionalmente utilizado em trabalhos científicos. Nas tabelas que apresentam a análise do teste de médias, os valores representados pelas mesmas letras indica-se que não há contraste entre as médias de tais tratamentos. Já as médias apresentadas com letras diferentes, conclui-se diferença significativa entre as médias.

Nas Tabelas 4.1 e 4.3, apresentam-se os resultados da Análise de Variância (ANOVA) aplicada aos valores das frações granulométricas, considerando-se os tempos entre mistura e realização do ensaio como repetições, respectivamente, para as misturas solo 1-cal e solo 1-cimento, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%. Nas Tabelas 4.2 e 4.4, apresentam-se resultados do teste Tukey das porcentagens das frações argila, silte e areia, ao nível de 5% de probabilidade, para as misturas do solo 1 com os teores de 1%, 2% e 3% de cal e cimento.

Tabela 4.1. Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cal, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

Fração argila				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	636,13	318,065	
Resíduos	12	176,8	14,733	21,59**
Total	14	812,93	58,066	
Fração silte				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	251,2	125,6	
Resíduos	12	84,4	7,033	17,85**
Total	14	335,6	23,971	
Fração areia				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	104,93	52,465	
Resíduos	12	68,8	5,733	9,15**
Total	14	173,73	12,409	

** significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 4.2. Teste de médias (Tukey) dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cal, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si

Fração argila		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	63,2	a
2%	57,2	a
3%	47,4	b
Fração silte		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	8,4	a
2%	14	b
3%	18,4	b
Fração areia		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	28,4	a
2%	28,8	a
3%	34,2	b

Tabela 4.3. Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

Fração argila				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	1037,73	518,865	
Resíduos	12	173,2	14,433	35,949**
Total	14	1210,93	86,495	
Fração silte				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	409,73	204,865	
Resíduos	12	53,2	4,433	46,210**
Total	14	462,93	33,066	
Fração areia				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	176,4	88,2	
Resíduos	12	75,6	6,3	14**
Total	14	252	18	

** significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 4.4. Teste de médias (Tukey) dos valores das frações granulométricas das misturas solo 1-cimento, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si

Fração argila		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	59,4	a
2%	51,6	b
3%	39,2	c
Fração silte		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	10,6	a
2%	17,2	b
3%	23,4	c
Fração areia		
Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	30	a
2%	31,2	ab
3%	37,8	b

Avaliando-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.3, notou-se que, estatisticamente, as frações areia, silte e argila das misturas,

foram influenciadas pelas variações no tempo entre mistura e a realização do ensaio de granulometria, para ambos os tipos analisados de misturas, para o nível de probabilidade de 1%.

Nas Tabelas 4.2 e 4.4, analisou-se, pelo teste Tukey, o contraste das médias dos tratamentos realizados com a adição dos estabilizantes para as misturas solo 1-cal e solo 1-cimento, com a finalidade de se verificar quais tratamentos foram significativos nas alterações das frações granulométricas. Observou-se que para as misturas solo 1-cal, o teor de 3% ocasionou variação significativa nas frações argila e areia quando comparado com os teores de 1% e 2%, o que não ocorreu entre esses valores. Já para a fração silte, os teores de 2% e 3% não alteraram significativamente entre si, sendo que ambos apresentaram contraste com teor de 1% de cal. Nas misturas solo 1-cimento, os teores de 1%, 2% e 3% foram responsáveis por alterações significativas nas frações argila e silte. Na fração areia só houve diferença nos contrastes das médias dos tratamentos de 1% e 3% de cimento.

Nas Figuras 4.3 e 4.4, apresentam-se as variações ocorridas nas frações granulométricas do solo 2, ocasionadas pela adição da cal e do cimento, respectivamente, bem como a influência dos tempos decorridos entre mistura e realização dos ensaios de granulometria no molde do estudo realizado com o solo 1. Nessas Figuras 4.3 e 4.4, pode-se verificar que as misturas solo 2-cal não sofreram alterações significativas nas frações granulométricas quando comparadas com as misturas solo 1-cal, em decorrência da menor porcentagem da sua fração argila, que consiste na parte ativa que participa de, praticamente, todas as reações físico-químicas que ocorrem no solo. Da mesma maneira, com base nas Figuras 4.4(d) a 4.4(f), para fins práticos, pode-se afirmar que as reações de hidratação, que ocorreram a curto prazo não foram efetivas nas misturas solo 2-cimento, uma vez que não houve alterações significativas na composição granulométrica, quando se analisou o tempo entre mistura e realização dos ensaios de granulometria.

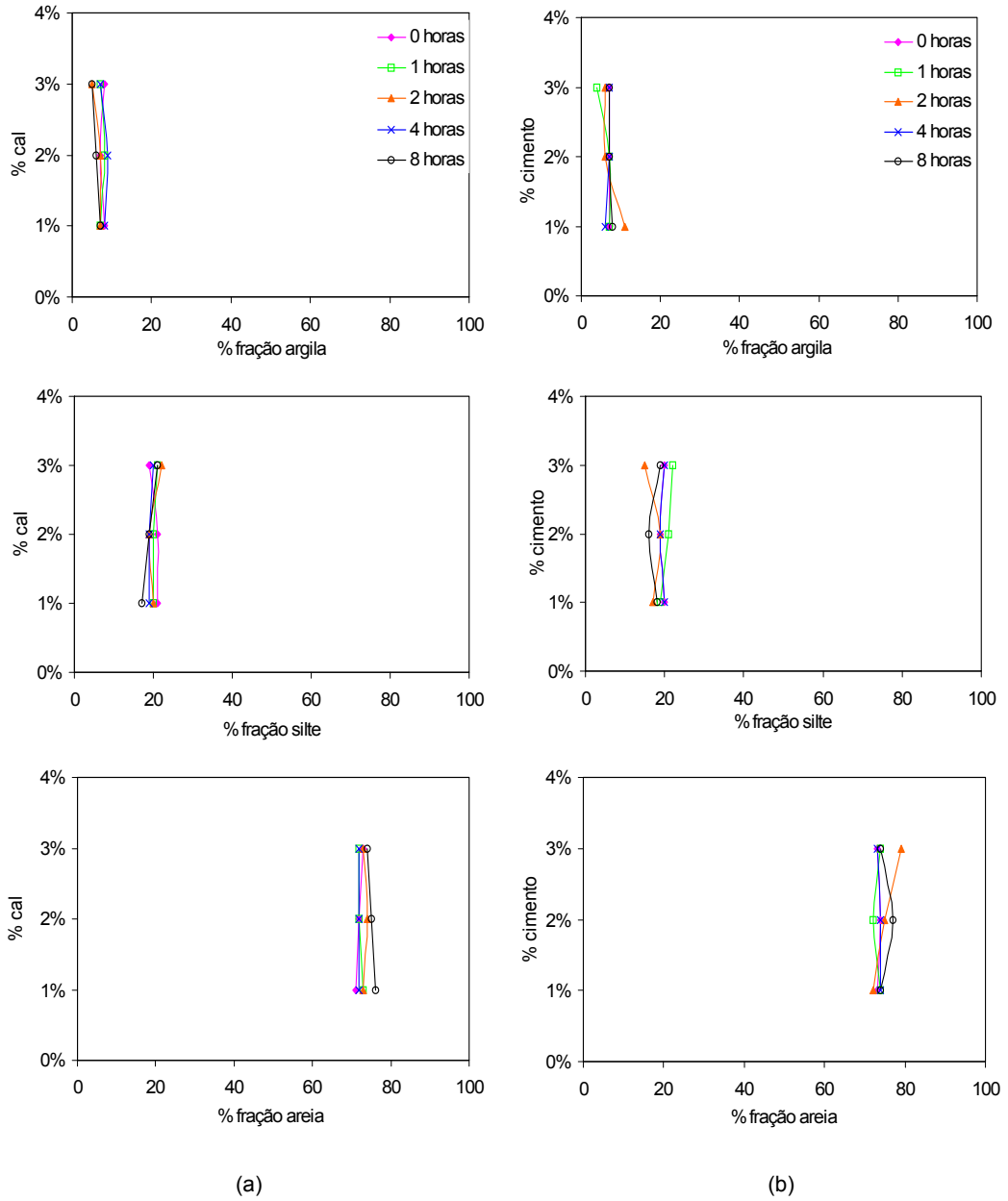


Figura 4.3. Variação das frações granulométricas das misturas solo 2-cal (a) e solo 2-cimento (b), com os tempos de descanso entre mistura e realização do ensaio de granulometria.

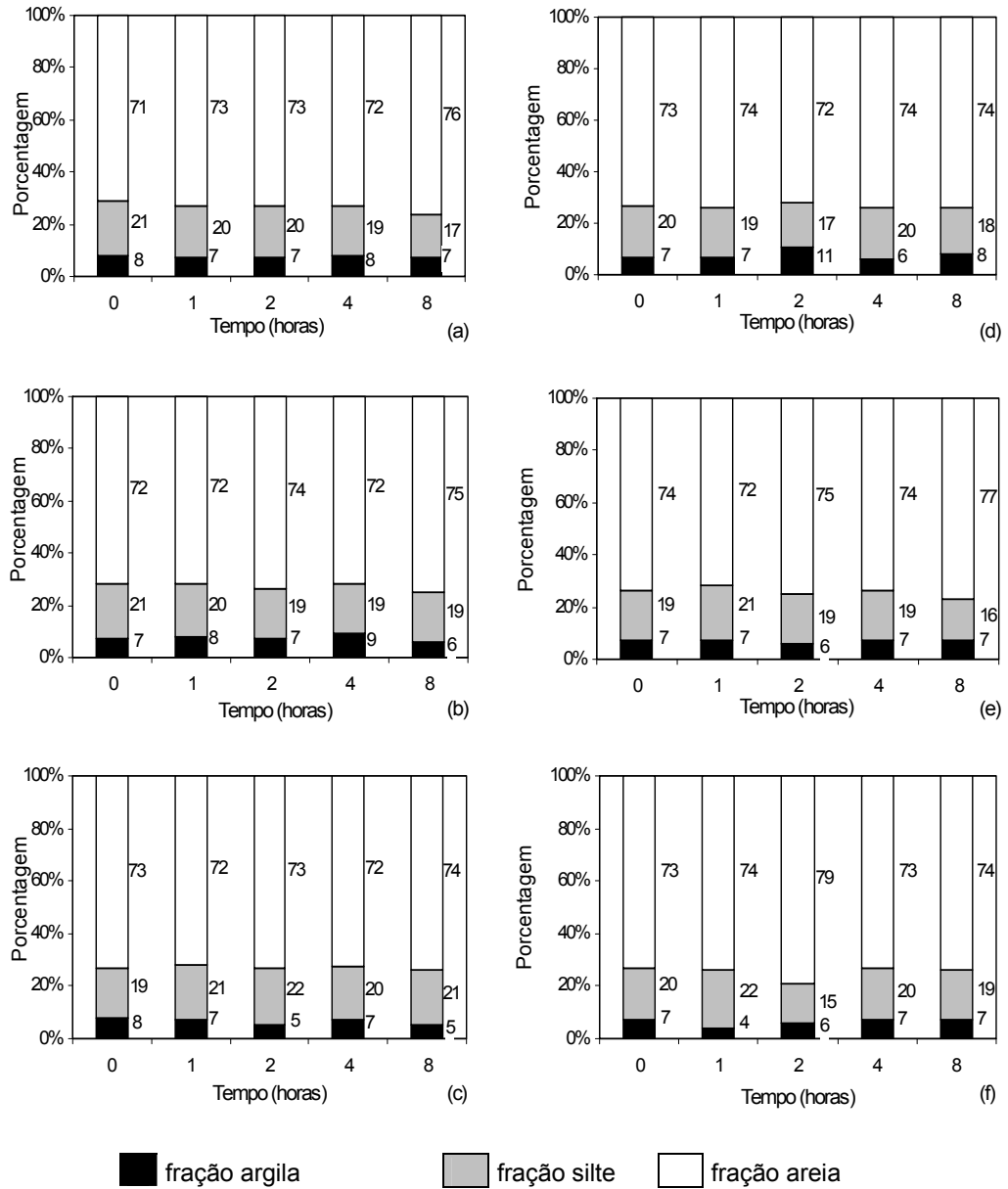


Figura 4.4. Variação das frações granulométricas das misturas solo 2- 1% cal (a), solo 2-2% cal (b), solo 2-3% cal (c), solo 2-1% cimento (d), solo 2-2% cimento (e) e solo 2-3% cimento (f), com os tempos de descanso entre mistura e a realização do ensaio de granulometria.

Apesar da influência pouco expressiva do tempo decorrido entre mistura e realização do ensaio na composição granulométrica, nas Figuras 4.4.(a) a 4.4.(c), pode-se observar que as maiores modificações ocorreram no tempo de 8 horas, sendo para o teor de 3% do estabilizante, a taxa de variação mostrou-se maior. Já, para misturas solo 2-cimento, o tempo que levou à ocorrência de maior aglomeração de partículas oscilou com o teor avaliado.

Os resultados da Análise de Variância dos valores das frações granulométricas são apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6, considerando-se os tempos entre mistura e ensaio de granulometria como repetições, respectivamente, para as misturas solo 2-cal e solo 2-cimento, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%. Avaliando-se os resultados apresentados nessas Tabelas, notou-se que, estatisticamente, os valores das frações granulométricas não foram influenciados pelas variações no tempo entre mistura e realização do ensaio, para ambos os tipos de misturas analisadas.

Tabela 4.5. Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 2-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

Fração argila				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	3,333	1,666	1,470 ^{ns}
Resíduos	12	13,6	1,133	
Total	14	16,933	1,209	
Fração silte				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	4,133	2,066	1,409 ^{ns}
Resíduos	12	17,6	1,467	
Total	14	21,733	1,552	
Fração areia				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,13	0,065	0,031 ^{ns}
Resíduos	12	24,8	2,067	
Total	14	24,93	1,781	

^{ns} não significativo

Tabela 4.6. Análise de variância dos valores das frações granulométricas das misturas solo 2-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

Fração argila				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	6,533	3,266	
Resíduos	12	22,4	1,867	1,750 ^{ns}
Total	14	28,933	2,067	
Fração silte				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,533	0,266	
Resíduos	12	46,4	3,867	0,069 ^{ns}
Total	14	46,933	3,352	
Fração areia				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	4,13	2,065	
Resíduos	12	41,6	3,467	0,596 ^{ns}
Total	14	45,73	3,266	

^{ns} não significativo

A ocorrência de modificações significativas na composição granulométrica dos solos tem sido relatada na literatura por Guimarães (1971), que detectou mudanças consideráveis na fração argila de solos após a adição de cal, nos teores de 3% e 5%, bem como por Osula (1996), que observou a ocorrência de alterações com 1%, 2% e 3% de cimento Portland e cal hidratada para um solo laterítico, e por Cristelo & Jalali (2004), que constataram a ocorrência de modificações com 2% de cal hidratada em dois solos residuais de granito.

De modo geral, as incorporações da cal e do cimento individualmente aos solos em estudo não produziram alterações significativas na composição granulométrica do solo 2, o que pode estar associado à sua menor porcentagem de fração argila em comparação com o solo 1, sendo esta a responsável maior pela ocorrência dos fenômenos de floculação. Em contrapartida, no caso do solo 1, as alterações foram expressivas, sendo que nas suas misturas com cal não se detectou a ocorrência de um tempo específico em que os fenômenos de floculação foram máximos. Observou-se que os tempos de maior floculação variam

para cada teor de estabilizante avaliado, sendo que nas misturas solo 1-cimento as alterações granulométricas foram maiores, principalmente após o período de tempo de 8 horas entre a mistura e a realização dos ensaios de granulometria.

4.1.2. Limites de Atterberg

Nas Tabelas 4.7 e 4.8 e nas Figuras 4.5 e 4.6, apresentam-se os resultados dos ensaios para a determinação dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) do solo 1 estabilizado com cal e com cimento, bem como os valores do índice de plasticidade (IP), considerando-se os tempos decorridos entre mistura e a realização dos ensaios de 0, 1, 2, 4 e 8 horas.

Tabela 4.7. Valores dos limites de Atterberg das misturas solo 1-cal para diferentes teores e tempos entre mistura e realização dos ensaios

Mistura Solo 1 - Cal (1%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso(horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	60	59	66	67	58
LP(%)	33	32	36	36	37
IP(%)	27	27	30	31	21
Mistura Solo 1 - Cal (2%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso(horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	60	67	63	62	62
LP(%)	33	38	33	38	36
IP(%)	27	29	30	24	26
Mistura Solo 1 - Cal (3%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso(horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	62	71	68	68	70
LP(%)	38	39	40	40	41
IP(%)	24	32	28	28	29

LL – Limite de liquidez, LP – Limite de plasticidade, IP – Índice de plasticidade

Tabela 4.8. Valores dos limites de Atterberg das misturas solo 1-cimento para diferentes teores e tempos entre mistura e realização dos ensaios

Mistura Solo 1 – Cimento (1%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso(horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	63	60	67	63	71
LP(%)	34	34	36	36	38
IP(%)	29	26	31	2	33
Mistura Solo 1 – Cimento (2%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso(horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	65	65	67	61	59
LP(%)	39	38	38	38	37
IP(%)	26	27	29	23	22
Mistura Solo 1 – Cimento (3%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso(horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	63	62	68	66	65
LP(%)	37	38	39	41	36
IP(%)	26	24	29	25	29

LL – Limite de liquidez, LP – Limite de plasticidade, IP – Índice de plasticidade

Na Tabela 4.7 e na Figura 4.5, apresentaram-se os comportamentos do solo 1 estabilizado com cal, em termos de LL, LP e IP. Considerando-se esse último parâmetro como representativo da plasticidade dos solos e misturas. Não se observou a ocorrência de um comportamento definido do IP com os teores de cal ao longo dos tempos avaliados, ao contrário do relatado por Osula (1996), que verificou diminuições nos valores deste parâmetro com o aumento dos teores de cal, em um solo laterítico. Vale destacar a queda imediata da plasticidade, que, possivelmente, está associada às reações de troca catiônica que se procedem instantaneamente, comportamento semelhante ao relatado por Osula (1996).

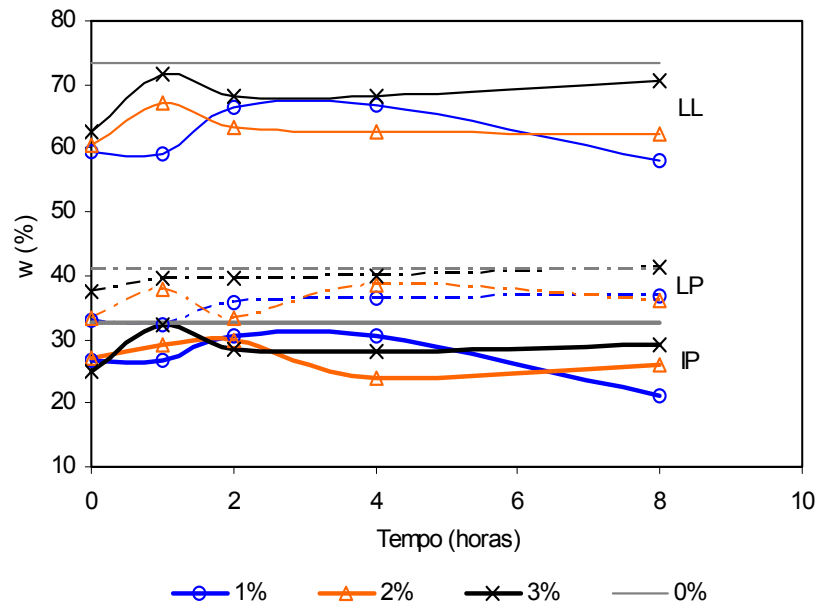


Figura 4.5. Influência da adição de cal nos parâmetros de plasticidade do solo 1, para diferentes períodos de tempo entre misturas e realização dos ensaios.

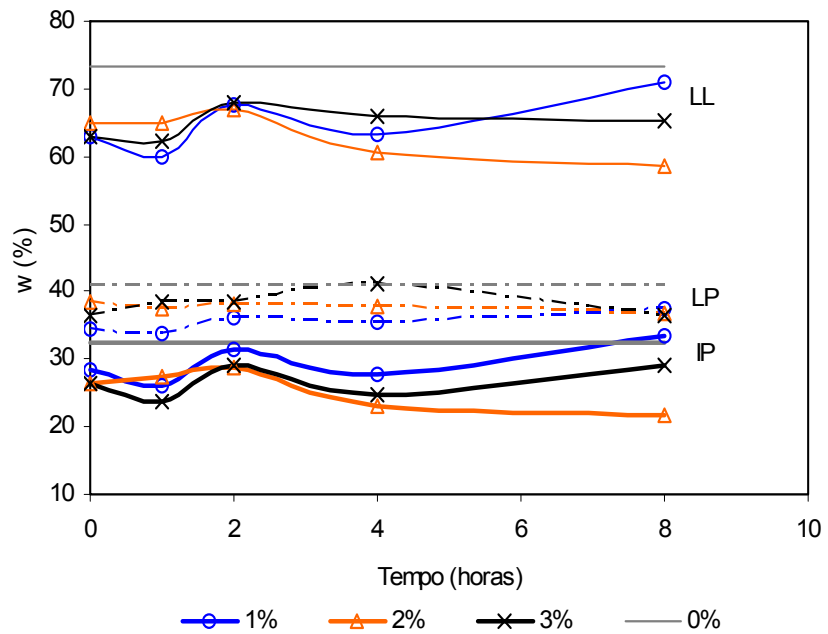


Figura 4.6. Influência da adição de cimento nos parâmetros de plasticidade do solo 1, para diferentes períodos de tempo entre misturas e realização dos ensaios.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 4.8 e na Figura 4.6 mostrou que o cimento foi menos eficiente do que a cal na queda da plasticidade do solo 1, instantaneamente a adição do estabilizante, sendo que as quedas do IP acompanharam os aumentos dos teores de cimento. Observou-se, também, um comportamento não definido do IP com os teores de cimento e com o tempo decorrido entre mistura e ensaio, à semelhança do que ocorreu nas misturas solo-cal, porém, as trajetórias dos teores estudados seguiram o mesmo comportamento. As variações mais significativas, para o tempo decorrido entre mistura e ensaio, ocorreram, em geral, para o tempo de 8 horas.

Vale destacar que as variações observadas na plasticidade das misturas solo-cal estavam diretamente relacionadas à ocorrência de reações de troca catiônica que se processaram a curto prazo. Por esse motivo, esperava-se a ocorrência de maiores alterações no IP nas misturas solo-cal após poucas horas de mistura. Por outro lado, nas misturas solo-cimento, ocorreram reações de troca catiônica, bem como de hidratação que podem ter ocasionado maiores modificações na plasticidade a tempos maiores entre mistura e ensaio.

Nas Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam-se os resultados da Análise de Variância aplicada aos valores dos índices de plasticidade, considerando-se os tempos entre mistura e realização dos ensaios como repetições, respectivamente, para as misturas solo 1-cal e solo 1-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%. Avaliando-se os resultados apresentados, observou-se que, estatisticamente, os valores de IP não foram influenciados pelas variações no tempo entre mistura e ensaios, para ambos os tipos de misturas analisados.

Tabela 4.9. Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 1-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	9,44	4,72	
Resíduos	12	106,64	8,887	0,531 ^{ns}
Total	14	116,08	8,291	

^{ns} não significativo

Tabela 4.10. Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 1-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	41,8	20,9	
Resíduos	12	95,24	7,937	2,633 ^{ns}
Total	14	137,04	9,788	

^{ns} não significativo

Nas Tabelas 4.11 e 4.12 e nas Figuras 4.7 e 4.8, apresentam-se os resultados dos ensaios para a determinação dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) do solo 2 estabilizado com cal e com cimento, bem como os valores do índice de plasticidade (IP), considerando-se os tempos decorridos entre mistura e a realização dos ensaios de 0, 1, 2, 4 e 8 horas.

Tabela 4.11. Valores dos limites de Atterberg das misturas solo 2-cal para diferentes teores e tempos entre mistura e realização dos ensaios

Mistura Solo 2 - Cal (1%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso (horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	24	23	23	23	26
LP(%)	14	15	15	15	16
IP(%)	10	8	8	8	10
Mistura Solo 2 - Cal (2%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso (horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	24	23	23	24	25
LP(%)	12	15	15	16	15
IP(%)	12	8	8	8	10
Mistura Solo 2 - Cal (3%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso (horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	24	24	23	25	24
LP(%)	14	14	14	15	16
IP(%)	10	10	9	10	12

LL – Limite de liquidez, LP – Limite de plasticidade, IP – Índice de plasticidade

Tabela 4.12. Valores dos limites de Atterberg das misturas solo 2-cimento para diferentes teores e tempos entre mistura e realização dos ensaios

Mistura Solo 2 - Cimento (1%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso (horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	24	24	24	24	27
LP(%)	14	13	14	14	15
IP(%)	10	9	10	10	12
Mistura Solo 2 - Cimento (2%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso (horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	28	27	27	27	27
LP(%)	15	14	13	16	15
IP(%)	13	13	14	11	12
Mistura Solo 2 - Cimento (3%)					
Limites de Atterberg	tempo de descanso (horas)				
	0	1	2	4	8
LL(%)	27	28	29	28	28
LP(%)	15	16	15	14	16
IP(%)	12	12	14	14	12

LL – Limite de liquidez, LP – Limite de plasticidade, IP – Índice de plasticidade

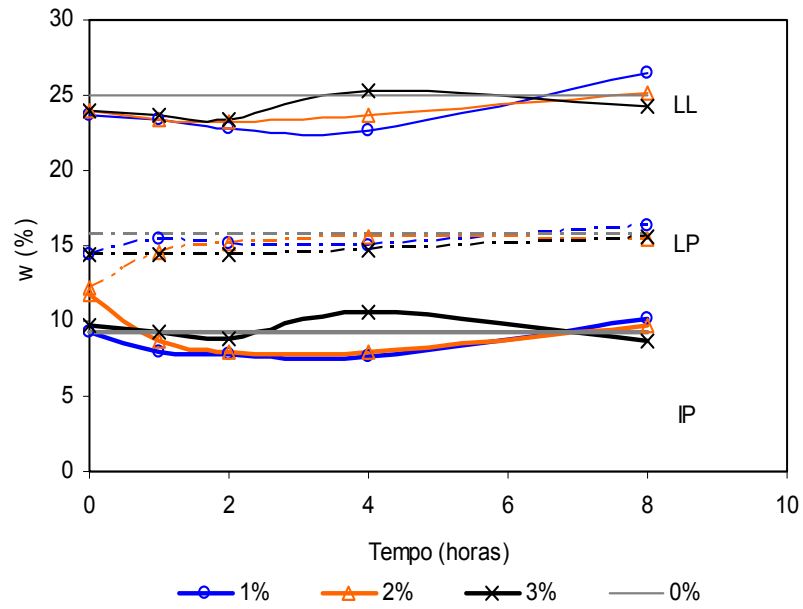


Figura 4.7. Influência da adição de cal nos parâmetros de plasticidade do solo 2, para diferentes períodos de tempo entre misturas e a realização dos ensaios.

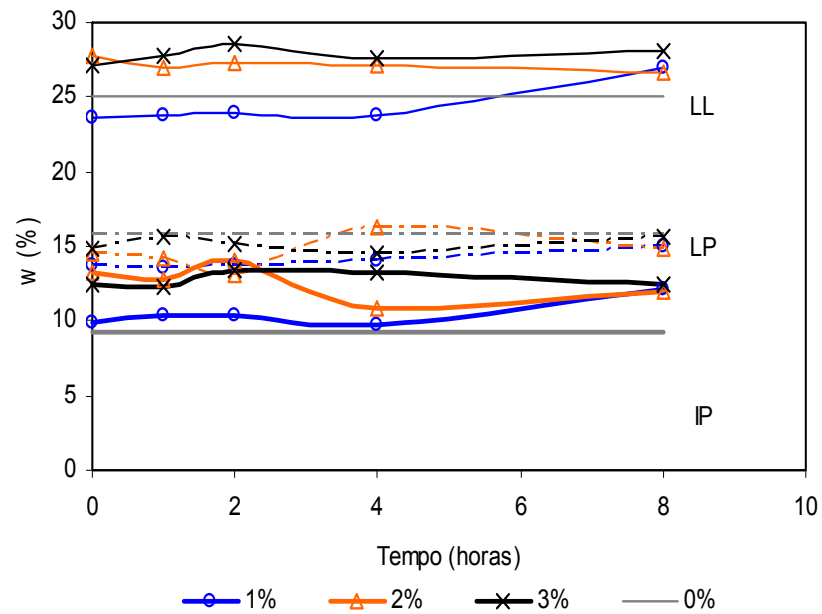


Figura 4.8. Influência da adição de cimento nos parâmetros de plasticidade do solo 2, para diferentes períodos de tempo entre misturas e a realização dos ensaios.

Na Tabela 4.11 e na Figura 4.7, apresentaram-se o comportamento de plasticidade do solo 2 estabilizado com cal, em termos de LL, LP e IP. Observou-se a ocorrência de oscilações nos valores em torno do valor de IP do solo 2 não tratado, proporcionando quedas e aumentos dos mesmos com o tempo decorrido entre mistura e realização do ensaio. As variações do IP nessas misturas foram menos significativas do que as variações observadas nas misturas solo 1-cal. Entre os tempos de 1 e 8 horas houve aumento dos valores de IP com os teores do aditivo, ao contrário do que foi encontrado por Osula (1996). Destacaram-se os teores de 1% e 2%, em que as variações mais expressivas ocorreram instantaneamente, não verificando variação a partir de 1 hora de prazo entre mistura e elaboração do ensaio. Constatou-se que a variação do IP com os tempos decorridos entre mistura e realização dos ensaios seguiu tendência semelhante, para os teores de 1% e 2% de cal, porém distinta, para o teor de 3%. De modo geral, as variações dos valores de IP com os tempos entre mistura e ensaios foram relativamente pequenas quando comparadas com as misturas realizadas com o solo 1. Observou-se que as variações promovidas nos valores de LP foram insignificantes, com pequenas quedas; já os valores de LL seguiram o comportamento do IP, sendo que não se presenciou variações até o tempo de 2 horas. Cabe salientar que as reações de troca catiônica atuantes no solo 2 foram menos intensas do que para o solo 1, uma vez que a porcentagem da sua fração argila é menor.

Os resultados apresentados na Tabela 4.12 e na Figura 4.8 demonstraram que o cimento provocou maior modificação da plasticidade. Observou-se a ocorrência de aumentos nos valores de IP com os teores de cimento, a partir do tempo entre mistura e ensaio de 2 horas. O tempo decorrido entre mistura e ensaio proporcionou variações pouco significativas nos teores de 1% e 3%. Do mesmo modo que o observado para as misturas solo 2-cal, os teores de 1% e 2% apresentaram comportamentos semelhantes, sendo que as maiores taxas de variação ocorreram no teor de 2%, o que pode estar associado, essencialmente, às reações de hidratação do cimento. Verificou-se que as variações dos valores de LL com os tempos entre mistura e ensaios foram insignificantes. Quando se avaliou a influência

dos teores de cimento, as variações nos valores de LL mostraram-se expressivas, enquanto que os valores de LP não apresentaram comportamento bem definido.

De modo geral, misturas realizadas com o solo 2 apresentaram variações menos significativas das misturas realizadas com o solo 1. O cimento mostrou-se mais eficiente na modificação de plasticidade para ambos os solos. Possivelmente, as reações de hidratação influenciaram nos comportamentos da plasticidade dos solos, no período de tempo entre 0 e 8 horas. Segundo Castro & Serafim Luis (1974), solos com elevado IP mostram-se mais suscetíveis à redução de plasticidade, enquanto aqueles moderadamente plásticos são menos afetados, podendo haver acréscimos no valor do IP.

Nas Tabelas 4.13 e 4.14 apresentam-se os resultados da Análise de Variância aplicada aos valores dos índices de plasticidade, considerando-se os tempos entre mistura e realização dos ensaios como repetições, respectivamente, para as misturas solo 2-cal e solo 2-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%. Avaliando-se os resultados apresentados na Tabela 4.13, observou-se que, estatisticamente, os valores de IP não foram influenciados pelas variações no tempo entre mistura e realização dos ensaios, para mistura solo 2-cal. Já para misturas solo 2-cimento, observou-se na Tabela 4.14 que os valores de IP foram influenciados significativamente pelas variações dos tempos entre mistura e realização dos ensaios para ao nível de probabilidade de 1%.

Na Tabela 4.15 analisa-se, pelo teste Tukey, o contraste das médias dos tratamentos, ao nível de 5% de probabilidade, realizados com a adição do estabilizante para as misturas solo 2-cimento, com a finalidade de se verificar quais tratamentos foram significativos nas alterações dos valores de IP. Observou-se que os contrastes das médias dos tratamentos realizados com teores de 2% e 3% de cimento não apresentaram variações significativas entre si. Já o teor de 1% do estabilizante apresentou variação significativa, quando comparado com os teores de 2% e 3% de cimento.

Tabela 4.13. Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 2-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	2,109	1,054	
Resíduos	12	17,39	1,449	0,728 ^{ns}
Total	14	19,499	1,393	

^{ns} não significativo

Tabela 4.14. Análise de variância dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 2-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	15,78	7,89	
Resíduos	12	10,783	0,899	8,78**
Total	14	26,563	1,897	

** significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 4.15. Teste de médias (Tukey) dos valores dos índices de plasticidade das misturas solo 1-cimento, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si

Tratamentos	\bar{X}	Comparação dos contrastes das médias
1%	10,476	a
2%	12,546	b
3%	12,744	b

4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Nas Tabelas 4.16 e 4.17 apresentam-se os valores dos parâmetros ótimos de compactação do solo 1 e das suas misturas com cal e cimento, respectivamente, bem como o efeito do tempo de espera entre mistura e realização dos ensaios de compactação. Na Figura 4.9, exibem-se os resultados do estudo da influência do tempo de espera entre a mistura e a realização do ensaio de compactação no peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) das misturas, enquanto que nas Figuras 4.10 e 4.11

sintetizam-se os resultados referentes às umidades ótimas (w_{ot}) das misturas solo-cal e solo-cimento, respectivamente.

Tabela 4.16. Valores do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_{ot}) para o solo 1 e misturas para diferentes teores de cal e tempos entre mistura e compactação

Teor	Tempo de descanso (horas)									
	0		1		2		4		8	
	w_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	w_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	w_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	w_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	w_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$
(%)	(%)	(kN/m ³)	(%)	(kN/m ³)	(%)	(kN/m ³)	(%)	(kN/m ³)	(%)	(kN/m ³)
1	27,72	14,72	28,2	14,62	28,52	14,79	28,55	14,67	28,96	14,58
2	29,43	14,6	27,93	14,7	28,94	14,49	27,75	14,67	28,14	14,85
3	28,92	14,56	28,66	14,61	29,4	14,62	27,95	14,67	29,6	14,51
Solo Puro	27,97	14,93								

w_{ot} – teor ótimo de umidade, $\gamma_{dm\acute{a}x}$ – peso específico aparente seco máximo

Tabela 4.17. Valores do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_{ot}) para o solo 1 e misturas para diferentes teores de cimento e tempos entre mistura e compactação

Teor	Tempo de descanso (horas)									
	0		1		2		4		8	
	w_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	w_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	w_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	w_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	w_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$
(%)	(%)	(kN/m ³)	(%)	(kN/m ³)	(%)	(kN/m ³)	(%)	(kN/m ³)	(%)	(kN/m ³)
1	28,93	15,42	27,67	15,03	27,27	15,12	26,28	15,1	27,83	14,82
2	26,64	15,08	27,93	14,95	26,35	15,07	27,73	14,99	27,96	14,9
3	27,52	15,12	28,08	14,89	27,77	14,95	27,74	15,02	26,79	15,13

w_{ot} – teor ótimo de umidade, $\gamma_{dm\acute{a}x}$ – peso específico aparente seco máximo

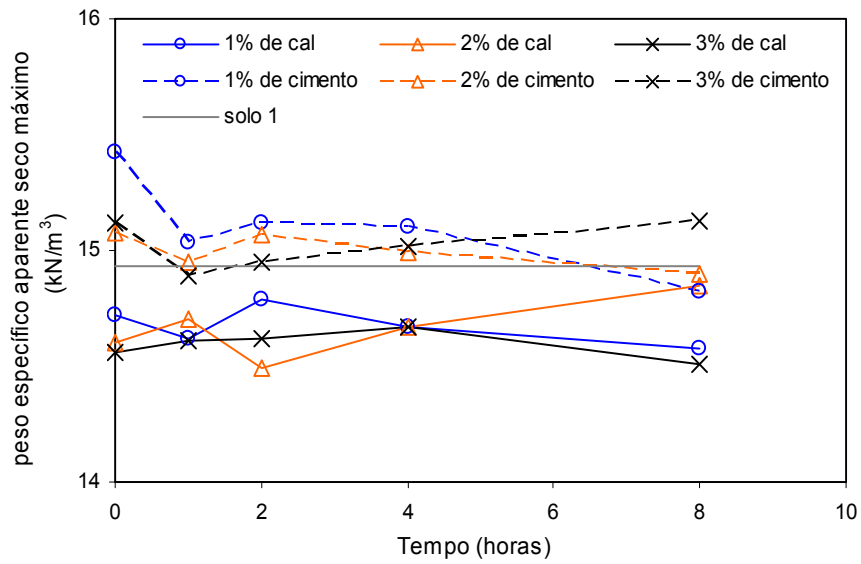


Figura 4.9. Influência do tempo entre mistura e compactação no peso específico aparente seco máximo das misturas solo 1 - cal e cimento.

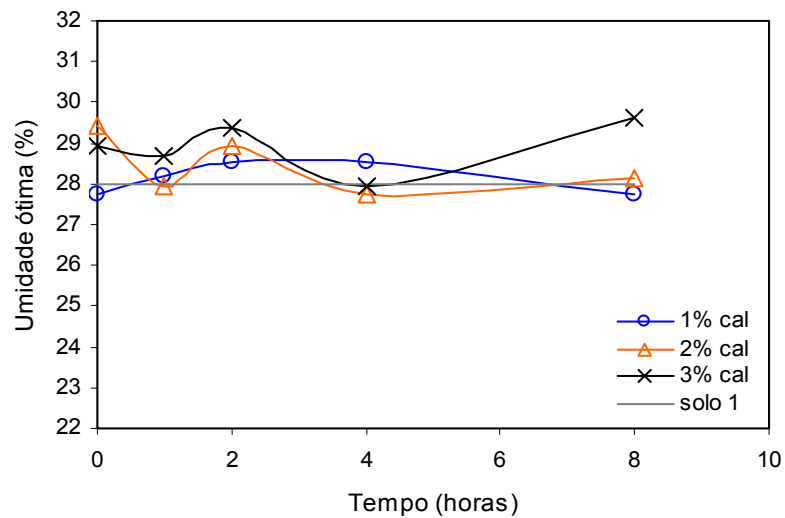


Figura 4.10. Influência do tempo entre mistura e compactação na umidade ótima das misturas solo 1 - cal.

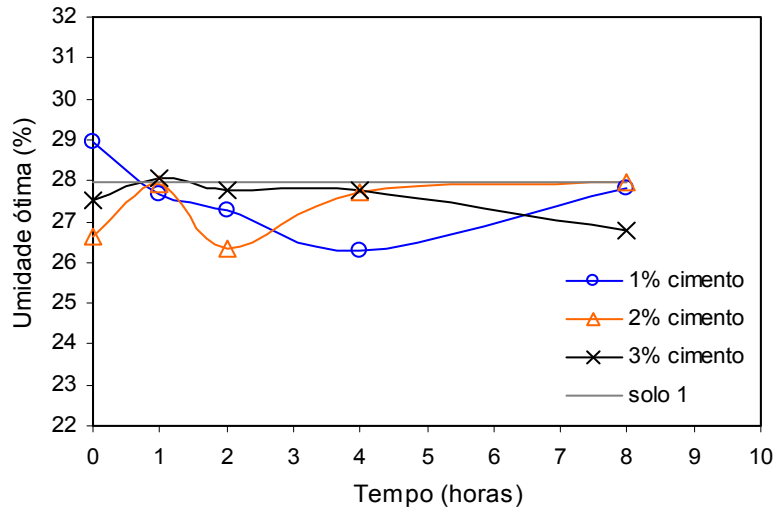


Figura 4.11. Influência do tempo entre mistura e compactação na umidade ótima das misturas solo 1 – cimento.

Na Figura 4.9, pode-se observar que nas condições de baixos teores dos estabilizantes empregados não ocorreram variações significativas nos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$, considerando-se as variações dos teores e os tempos entre mistura e compactação. Porém, nas misturas solo-cimento pode-se observar uma pequena queda no $\gamma_{dm\acute{a}x}$ com o aumento do teor de cimento, até o tempo de 4 horas, em concordância com Osula (1996). Com relação à influência do tempo entre mistura e compactação na $\gamma_{dm\acute{a}x}$, notou-se tendência similar no comportamento de $\gamma_{dm\acute{a}x}$, para os três teores de cimento estudados, até o tempo de 2 horas, o que pode estar relacionado com fenômenos imediatos de troca catiônica e consequente floculação, seguidas de hidratação do cimento. Percebe-se que a faixa de valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ foi maior para as misturas solo 1-cimento do que para as misturas solo 1-cal. Com relação às misturas solo 1-cal, na Figura 4.9, observou-se que os fenômenos de troca catiônica e floculação podem estar sendo efetivos, mas não se notou a ocorrência de um comportamento relativamente bem definido, como no caso das misturas solo-cimento, não se identificando queda sistemática de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e aumento de w_{ot} , contrariamente ao comportamento relatado na literatura por Mitchell e Hooper (1961), Osula (1996) e Osinubi (1998).

Quanto ao parâmetro w_{ot} , na Figura 4.10, notou-se a ocorrência de comportamento similar para os teores de cal de 2 e 3%, observando-se oscilações ao longo do tempo entre mistura e compactação, o que não se verificou para o teor de cal de 1%, quando ocorreram variações nitidamente menores e de pequena monta. Destaca-se que esses comportamentos contrariam o que se encontra relatado na literatura (Mitchell e Hooper 1961, Osula 1996 e Osinubi 1998), referindo-se a aumentos em w_{ot} com aumentos no teor de cal e no tempo entre mistura e compactação. No presente trabalho esse comportamento foi evidenciado somente para os tempos entre mistura e compactação de 1 e 2 horas e 4 e 8 horas. Na Figura 4.11, observa-se uma variação mais expressiva nos valores de w_{ot} das misturas solo 1-cimento com o tempo decorrido entre mistura e compactação do que no caso das misturas solo 1-cal, para os teores de 1 e 2% de cimento. Com relação ao teor de 3% de cimento, praticamente, não se observou influência do tempo decorrido entre mistura e compactação em w_{ot} .

As Tabelas 4.18 e 4.19 apresentam os resultados da Análise de Variância aplicada aos parâmetros $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot} , considerando-se os tempos entre mistura e compactação como repetições, respectivamente, para as misturas solo 1-cal e solo 1-cimento, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%.

Tabela 4.18. Análise de variância dos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot} das misturas solo 1-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

Peso específico aparente seco máximo				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,019	0,009	
Resíduos	12	0,113	0,009	1,009 ^{ns}
Total	14	0,132	0,009	
Umidade Ótima				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,81	0,405	
Resíduos	12	4,61	0,384	1,054 ^{ns}
Total	14	5,42	0,387	

^{ns} não significativo

Tabela 4.19. Análise de variância dos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot} das misturas solo 1-cimento, para os nı́veis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

Peso específico aparente seco máximo				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,027	0,013	0,638 ^{ns}
Resíduos	12	0,254	0,021	
Total	14	0,281	0,020	
Umidade ótima				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,24	0,12	0,207 ^{ns}
Resíduos	12	6,97	0,581	
Total	14	7,21	0,515	

^{ns} não significativo

Avaliando-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.18 e 4.19, observou-se que, estatisticamente, os valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot} não foram influenciados pelas variaoes no tempo entre mistura e compactaao, para ambos os tipos de mistura analisados.

Na Figura 4.12, representa-se a influência da cal e do cimento nos parâmetros ótimos de compactaao, imediatamente após a adiao destes produtos ao solo 1. Nas misturas solo 1-cal e solo 1-cimento, notou-se que aumentos nos teores dos estabilizantes na faixa de 1 a 3% produziram uma tendência de queda de w_{ot} , bem como de aumento de $\gamma_{dm\acute{a}x}$, no caso da cal, e a um comportamento errático, no caso do cimento.

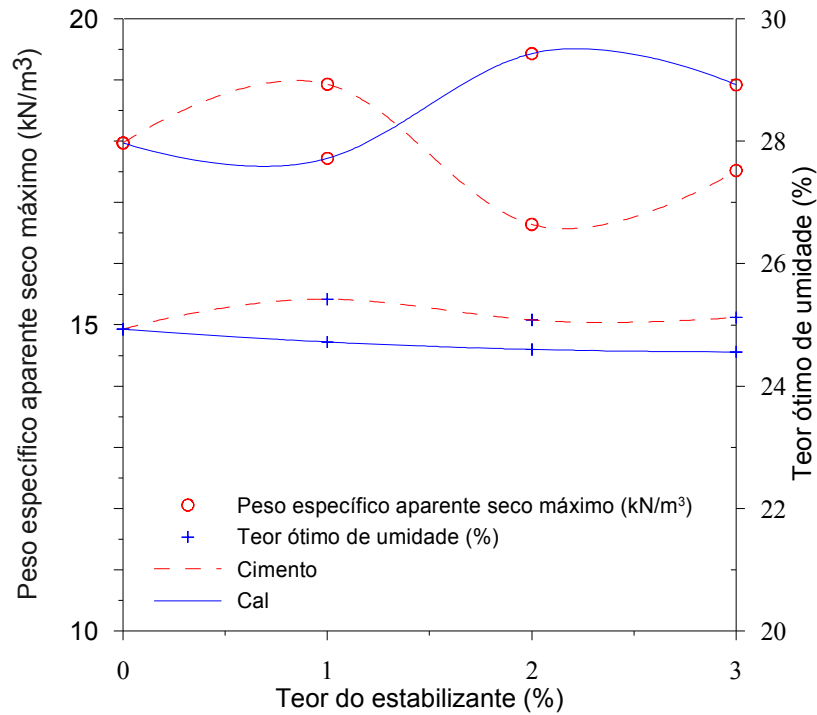


Figura 4.12 Efeito imediato da cal e cimento nos parâmetros ótimos de compactação das misturas com o solo 1.

Nas Tabelas 4.20 e 4.21, exibem-se os valores dos parâmetros ótimos de compactação do solo 2 e das suas respectivas misturas com cal e cimento, bem como o efeito do tempo de espera entre mistura e a realização dos ensaios de compactação. Na Figura 4.13, observa-se o comportamento do estudo da influência desse efeito no peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) das misturas do solo 2 com cal e cimento, enquanto que, nas Figuras 4.14 e 4.15, mostram-se os resultados referentes às umidades ótimas (w_{oi}) das misturas solo 2-cal e solo 2-cimento, respectivamente.

Tabela 4.20. Valores do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_{ot}) para o solo 2 e misturas para diferentes teores de cal e tempos entre mistura e compactação

Teor (%)	Tempo de descanso (horas)									
	0		1		2		4		8	
	$w_{ot}(\%)$	$\gamma_d(kN/m^3)$	$w_{ot}(\%)$	$\gamma_d(kN/m^3)$	$w_{ot}(\%)$	$\gamma_d(kN/m^3)$	$w_{ot}(\%)$	$\gamma_d(kN/m^3)$	$w_{ot}(\%)$	$\gamma_d(kN/m^3)$
1	12,25	18,19	12,36	18,05	12,82	18,17	12,51	18,16	12,94	18,14
2	12,46	18,28	12,79	18,32	12,96	18,09	12,59	18,22	12,68	18,20
3	13,02	18,38	12,68	18,30	12,76	18,15	12,18	18,31	12,83	18,18
Solo puro	12,61	18,42								

w_{ot} – teor ótimo de umidade, $\gamma_{dm\acute{a}x}$ – peso específico aparente seco máximo

Tabela 4.21. Valores do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_{ot}) para o solo 2 e misturas para diferentes teores de cimento e tempos entre mistura e compactação

Teor (%)	Tempo de descanso (horas)									
	0		1		2		4		8	
	$w_{ot}(\%)$	$\gamma_d(kN/m^3)$	$w_{ot}(\%)$	$\gamma_d(kN/m^3)$	$w_{ot}(\%)$	$\gamma_d(kN/m^3)$	$w_{ot}(\%)$	$\gamma_d(kN/m^3)$	$w_{ot}(\%)$	$\gamma_d(kN/m^3)$
1	12,24	18,61	12,71	18,47	12,31	18,45	12	18,71	12,82	18,34
2	12,16	18,56	12,24	18,53	12,87	18,4	12,41	18,54	12,88	18,31
3	12,35	18,41	12,63	18,47	12,2	18,55	11,79	18,39	12,29	18,24

w_{ot} – teor ótimo de umidade, $\gamma_{dm\acute{a}x}$ – peso específico aparente seco máximo

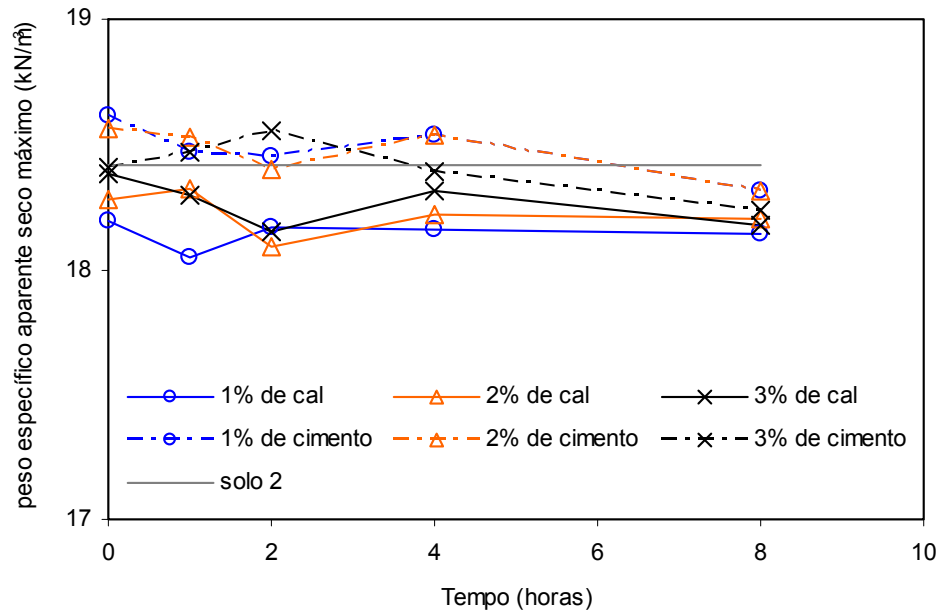


Figura 4.13. Influência do tempo entre mistura e compactação na peso específico aparente seco máximo das misturas solo 2 - cal e cimento.

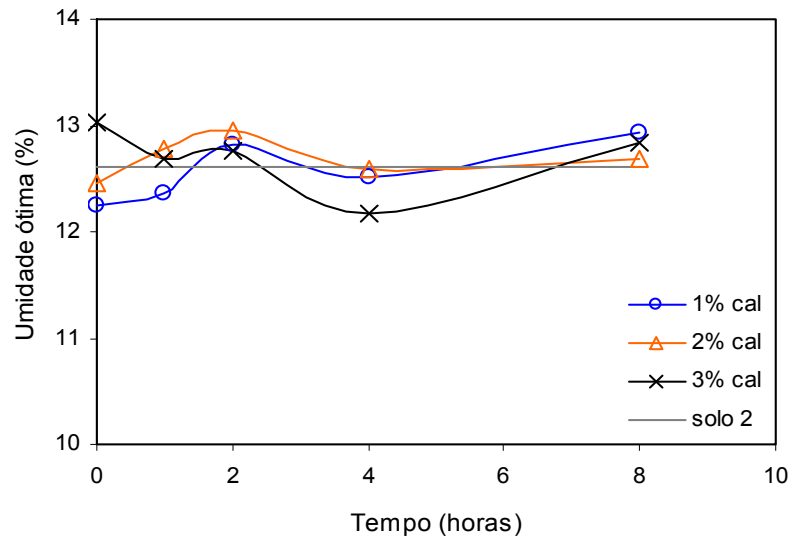


Figura 4.14. Influência do tempo entre mistura e compactação no teor de umidade ótima das misturas solo 2 - cal.

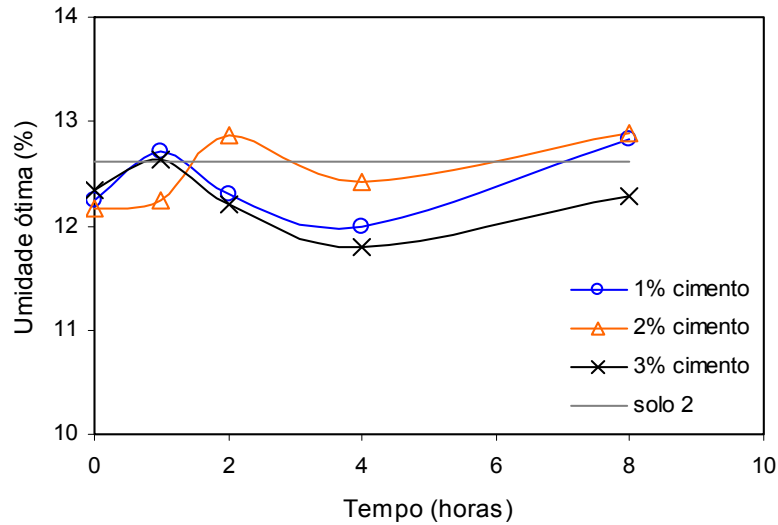


Figura 4.15. Influência do tempo entre mistura e compactação no teor de umidade ótima das misturas solo 2 – cimento.

Na Figura 4.13, observou-se que os teores dos estabilizantes adicionados ao solo 2, não foram suficientes para causar variações significativas nos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$, considerando-se as variações dos teores e os tempos entre mistura e compactação. Ao contrário do citado por Osula (1996), houve aumento nos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ com aumento do teor de cal, para quase todos os tempo entre a mistura e a compactação, com exceção do tempo de 2 horas. As misturas com cimento apresentaram queda de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ com os teores, a partir do tempo de 4 horas. Antes disso, não houve tendência definida de comportamento, o que pode estar associado às reações rápidas de troca catiônica e floculação, e, particularmente para o cimento, às reações de hidratação. Quanto à influência do tempo entre mistura e compactação no parâmetro $\gamma_{dm\acute{a}x}$, notou-se tendência similar para os três teores de cal ou cimento, a partir do tempo de 4 horas, o que, segundo Osinubi (1998), foi causado por reações de trocas catiônicas e floculação das partículas de argila, sendo que devido à demora na compactação, os produtos de hidratação se unem às partículas, tornando necessária à ruptura dessas agregações para que o solo possa ser compactado satisfatoriamente. Nas primeiras horas, as misturas solo 2 com

teores de cal de 2% e 3% seguiram a mesma tendência de comportamento, diferenciando-se do comportamento do solo estabilizado com 1% de cal. Já, para as misturas solo 2-cimento, percebeu-se que a semelhança de comportamento estava relacionada com os teores de 1% e 2%. Com base nos resultados apresentados, acredita-se que o efeito da hidratação do cimento foi efetivo nas misturas com 3% do estabilizante.

Quanto ao parâmetro w_{ot} , nas Figuras 4.14 e 4.15, notou-se que para os teores avaliados, as variações nestes valores de compactação das misturas solo-cal e solo-cimento foram pouco expressivas.

Com relação aos possíveis aumentos no parâmetro w_{ot} com aumentos no teor de cal e de cimento, conforme se relata na literatura (MITCHELL & HOOPER 1961, OSULA 1996, OSINUBI 1998), verificou que essa tendência não ocorreu nas misturas obtidas com o solo 2. Quanto à influência do tempo entre mistura e compactação na umidade ótima, na Figura 4.14, verificou-se que as misturas solo 2-cal não apresentaram comportamentos definidos; já, nas misturas solo 2-cimento, na Figura 4.15, observou-se que a partir do tempo de 2 horas, o comportamento foi semelhante para os três teores analisados.

Nas Tabelas 4.22 e 4.23, apresentam-se os resultados da Análise de Variância aplicada aos parâmetros $\gamma_{dmáx}$ e w_{ot} , considerando-se os tempos entre mistura e compactação como repetições, respectivamente, para as misturas solo 2-cal e solo 2-cimento, ao níveis de probabilidade de 1% e 5%.

Tabela 4.22. Análise de variância dos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot} das misturas solo 2-cal, para os nı́veis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

Peso específico aparente seco máximo				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,038	0,019	2,85 ^{ns}
Resíduos	12	0,08	0,007	
Total	14	0,118	0,008	
Umidade ótima				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,047	0,023	0,317 ^{ns}
Resíduos	12	0,889	0,074	
Total	14	0,936	0,067	

^{ns} não significativo

Tabela 4.23. Análise de variância dos valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot} das misturas solo 2-cimento, para os nı́veis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

Peso específico aparente seco máximo				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,012	0,006	0,48 ^{ns}
Resíduos	12	0,15	0,012	
Total	14	0,162	0,012	
Umidade ótima				
F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,173	0,086	0,794 ^{ns}
Resíduos	12	1,307	0,109	
Total	14	1,48	0,106	

^{ns} não significativo

Avaliando-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.22 e 4.23, notou-se que, estatisticamente, os valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot} não foram influenciados pelas variaoes no tempo entre mistura e compactaao, para ambos os tipos analisados de misturas.

Na Figura 4.16, representou-se a influência da cal e do cimento nos parâmetros ótimos de compactaao, imediatamente após a adiao destes produtos ao solo 2. Nas misturas solo 2-cal, observou-se uma queda no $\gamma_{dm\acute{a}x}$, até o teor de 1%, sendo que a partir do mesmo ocorreu aumento

gradual deste parâmetro. Com relação à w_{ot} , pode-se visualizar comportamento idêntico ao ocorrido com $\gamma_{dmáx}$. Nessa Figura, para as misturas solo-cimento, verificou-se ocorrência de aumento do $\gamma_{dmáx}$, até o teor de 1%, e queda a partir do mesmo. Já para a w_{ot} , notou-se comportamento inverso, ou seja, queda do w_{ot} , até o teor de 1% de cimento, seguida de aumento a partir deste ponto.

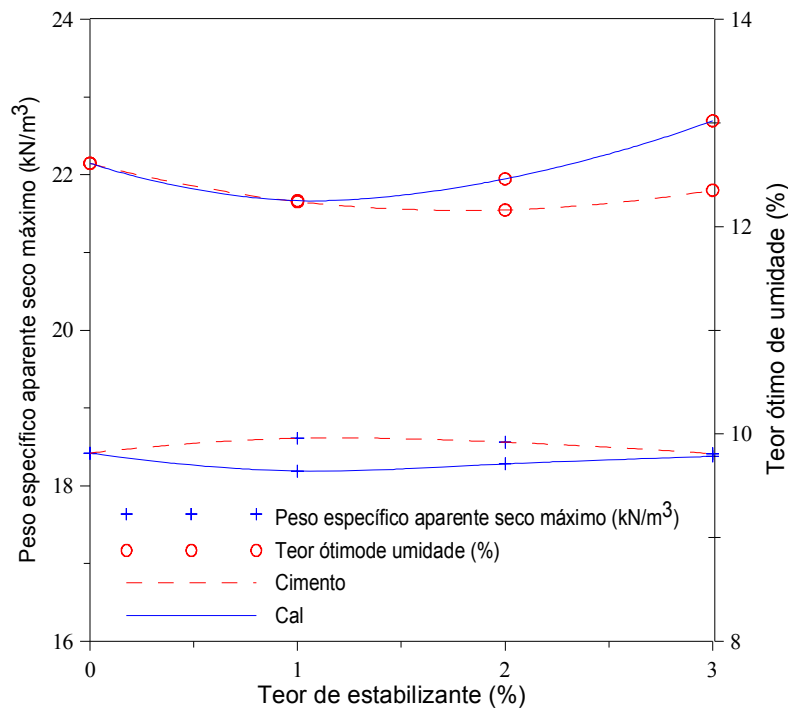


Figura 4.16. Efeito imediato da cal e cimento nos parâmetros ótimos de compactação das misturas com o solo 2.

4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO NÃO-CONFINADA

Nas Figuras 4.17 e 4.18, sintetizam-se os comportamentos do parâmetro resistência à compressão não-confinada (RCNC) das misturas solo 1-cal, para os tempos de cura dos corpos-de-prova de 7 e 28 dias, respectivamente, bem como a influência do tempo entre mistura e compactação neste parâmetro.

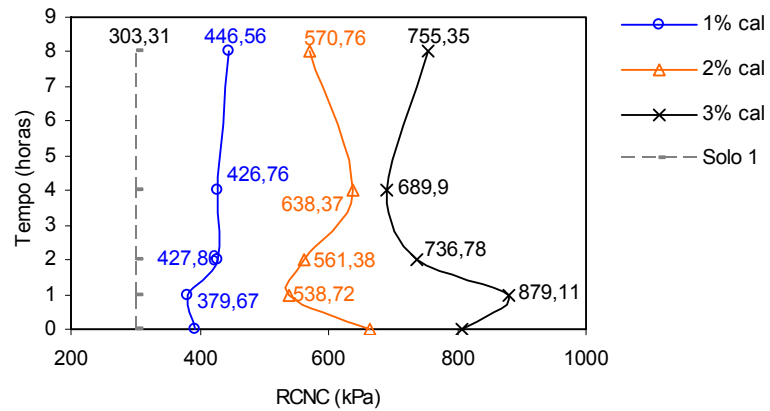


Figura 4.17. Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 1-cal, para o período de cura dos corpos-de-prova de 7 dias.

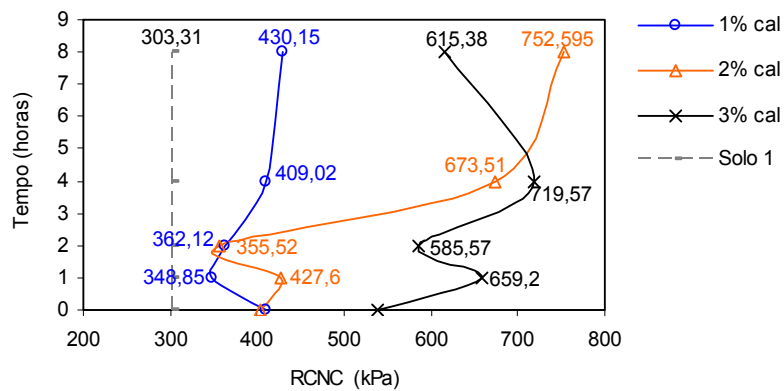


Figura 4.18. Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 1-cal, para o período de cura dos corpos-de-prova de 28 dias.

Na Figura 4.17, verificou-se que houve aumento de RCNC com o aumento dos teores de cal nas misturas com o solo 1, para o tempo de cura de 7 dias. Evidenciaram-se aumentos da ordem de 47%, 110% e 190% com relação ao solo 1, para teores de cal de 1%, 2% e 3%, respectivamente. Com relação ao efeito do tempo entre mistura e compactação das amostras na resistência mecânica das misturas, observou-se que o comportamento não apresentou uma tendência definida para todos os teores, notando-se, porém, certa semelhança geométrica entre os resultados dos teores de cal de 1% e 2%.

Na Figura 4.18, observou-se que, de modo geral, houve aumento de RCNC com os teores de cal, no período de cura de 28 dias. Os aumentos mais significativos foram da ordem de 42%, 148% e 137%, para os teores de cal de 1%, 2% e 3%, respectivamente. Verificou-se, também, certa semelhança geométrica de comportamento, para os teores de cal de 2% e 3%, até o período de descanso entre mistura e compactação de 4 horas, embora se pudesse afirmar que, globalmente, os melhores resultados ocorreram para os tempos entre mistura e compactação de 4 e 8 horas.

Analisando-se, comparativamente, os resultados apresentados nas Figuras 4.17 e 4.18, verificou-se que, para o tempo de cura de 28 dias, ocorreram reduções nos valores de resistência mecânica, à exceção das misturas preparadas com 2% de cal, nos tempos entre mistura e compactação de 4 e 8 horas. Uma hipótese para a ocorrência desse comportamento contrário ao que se relata na literatura (TRB 1976, LIMA 1981, ALCÂNTARA 1995, MENDONÇA 1998), foi que, para os teores de cal utilizados, as reações pozolânicas não provocaram cimentação suficiente para ocasionar aumentos de resistência, em concordância com Ingles e Metcalf (1973). Esses autores destacaram que a adição de pequenos incrementos de cal ao solo, até aproximadamente 2%, foi suficiente para promover a completa substituição dos cátions na superfície da argila; mas, ainda insuficiente para desencadear a ocorrência de reações pozolânicas de cimentação entre as partículas do solo.

Na Tabela 4.24 apresentam-se os resultados da Análise fatorial de Variância, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%, aplicada aos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 1-cal, considerando como tratamentos: a adição do estabilizante nos teores de 1%, 2% e 3%, e os tempos de cura de 7 e 28 dias; estabelecendo-se os tempos entre mistura e compactação como repetições. Analisando-se os dados apresentados na Tabela 4.25, notou-se que não houve interação significativa entre os tempos de cura e os teores de cal. Assim, torna-se necessária uma nova análise de variância, conforme Tabela 4.25, considerando-se a combinação entres os tratamentos isoladamente (7 dias x 1%, 7 dias x 2%, 7 dias x 3%, 28 dias x 1%, 28 dias x 2% e 28 dias x 3%), assim cada combinação constituirá um tratamento

(BANZATTO e KRONKA, 2006). Analisando essa tabela, verifica-se que, estatisticamente, o tempo decorrido entre mistura e compactação influenciou significativamente nos valores de resistência, ap nível de probabilidade de 1%, considerando os tratamentos anteriormente citados. Associando-se ambos os tratamentos, observou-se que os períodos em que os corpos-de-prova foram curados não influenciaram significativamente nas alterações dos valores de resistência, ocorrendo variações somente com os teores avaliados em seus diferentes tempos de cura.

Na Tabela 4.26 mostra-se através do teste de médias (Tukey) a influência da adição de cal na resistência a compressão simples do solo 1, para os tempos de cura de 7 e 28 dias, ao nível de probabilidade de 5%. Neste caso, onde pode haver influência de dois tratamentos, representou-se a análise de comparação entre as médias em tabelas onde se pôde comparar cada tratamento isoladamente. Assim, as médias de cada tratamento foram expostas em linhas e colunas, onde na casa em que houve contraste significativo entre os tratamentos requeridos foi inserido um asterisco, caso contrário não houve contraste entre as médias.

Na Tabela 4.26 observou-se que para o tempo de cura de 7 dias, notou-se a ocorrência de contrastes significativos das médias dos tratamentos realizados com teores 1%, 2% e 3% de cal, apresentando variações significativas entre si. Já, para o tempo de cura de 28 dias, observou-se a ocorrência de diferenças não significativas nos valores de resistência entre os teores de 1% e 2% de cal, o mesmo ocorrendo entre os teores de 2% e 3% de cal. Já entre os teores de 1% e 3% a variação foi significativa.

Tabela 4.24. Análise fatorial de variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 1-cal , para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio, Trat. 1 – tempos de cura, Trat. 2 – teores de estabilizante

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Trat. 1	1	49911	49911	6,428*
Trat. 2	2	435654	217827	28,053**
Trat. 1 x Trat. 2	2	20540	10270	1,323 ^{ns}
Resíduos	24	186353	7764,708	
Total	28	236264	8438	

** significativo ao nível de 1% de probabilidade

* significativo ao nível de 5% de probabilidade

^{ns} não significativo

Tabela 4.25. Análise de variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 1-cal, sem interação entre os tratamentos, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio, Trat. 1 – tempos de cura, Trat. 2 – teores de estabilizante

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	5	506105	101221	
Resíduos	24	186353	7765	13,035**
Total	29	692458	23877,9	

** significativo a 1% de probabilidade

* significativo a 5% de probabilidade

^{ns} não significativo

Tabela 4.26. Teste de médias (Tukey) dos valores de resistência à compressão na confinada das misturas solo 1-cal, para um níveis de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si

Trat. 1	Trat. 2	\bar{X}	7 dias			28 dias		
			1%	2%	3%	1%	2%	3%
			414,86	594,48	773,47	392,06	522,46	623,56
7 dias	1%	414,86		*	*			*
	2%	594,48	*		*	*		
	3%	773,47	*	*		*	*	
28 dias	1%	392,06		*	*			*
	2%	522,46			*			
	3%	623,56	*			*		

* Diferença significativa entre as médias

Nas Figuras 4.19 e 4.20, apresentam-se os comportamentos da RCNC, nos tempos de cura de 7 e 28 dias, respectivamente, das misturas solo 1-cimento, bem como a influência do tempo entre mistura e compactação neste parâmetro.

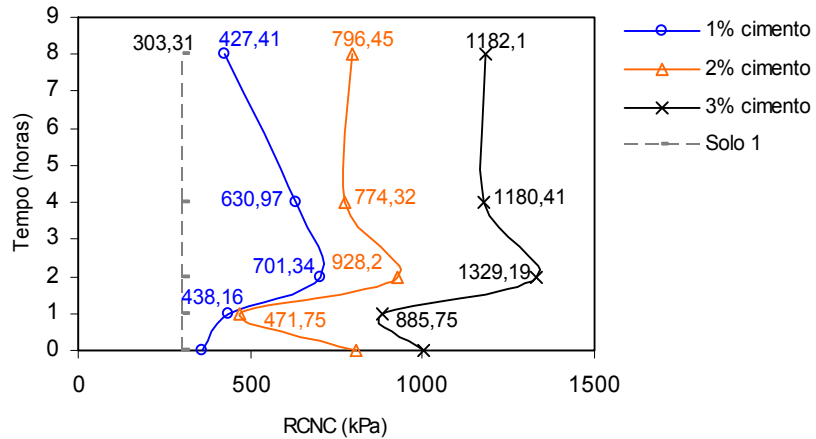


Figura 4.19. Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 1-cimento, para o período de cura dos corpos-de-prova de 7 dias.

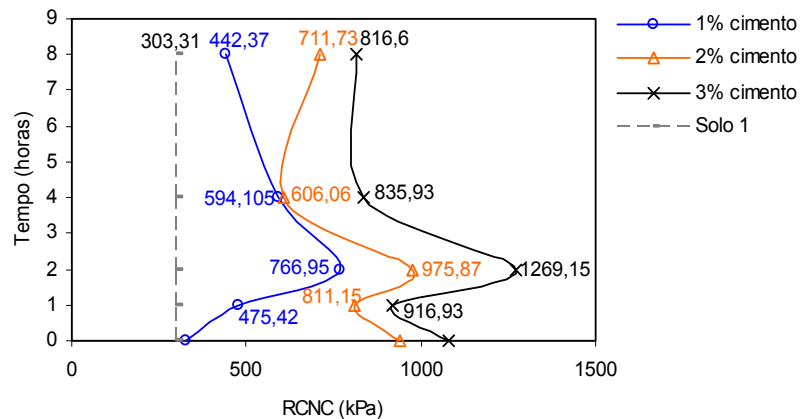


Figura 4.20. Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 1-cimento, para o período de cura dos corpos-de-prova de 28 dias.

Na Figura 4.19, observou-se a ocorrência de aumentos expressivos da RCNC com os teores de cimento empregados, para o período de cura de 7 dias, podendo-se referir a percentuais máximos da ordem de 130, 206 e

338% com relação ao solo 1, para teores de cimento de 1, 2 e 3%, respectivamente. Vale destacar que esses aumentos foram maiores do que aqueles proporcionados pela adição de cal, nas mesmas condições de análise. Com relação à influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC, na Figura 4.19, observou-se a ocorrência de comportamento bem definido, dando-se destaque ao tempo de 2 horas como o ótimo, onde se obteve maiores valores de resistência mecânica para os teores estudados. A partir do tempo de 4 horas, pode-se perceber uma tendência de estabilização do comportamento, para os teores de 2 e 3% de cimento, e de queda, para o teor de 1% deste produto. Acredita-se que para tempos maiores, a tendência seria de queda de RCNC, aventando-se a possibilidade de que reações de hidratação e de cimentação começassem a interferir significativamente no processo.

Na Figura 4.20, observou-se, também, a ocorrência de aumentos expressivos na RCNC, com comportamento similar ao ocorrido no caso das misturas curadas durante 7 dias (Figura 4.19), porém em níveis menores. Assim, em geral, verificou-se a ocorrência de valores menores para as amostras curadas durante 28 dias, em concordância com os resultados apresentados para as misturas solo 1-cal.

Na Tabela 4.27 apresentam-se os resultados da Análise fatorial de Variância, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%, aplicada aos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 1-cimento, considerando como tratamentos a adição do estabilizante nos teores de 1%, 2% e 3%, e os tempos de cura de 7 e 28 dias, bem como se estabelecendo os tempos entre mistura e compactação como repetições. Do mesmo modo ocorrido com as misturas solo 1-cal, a não interação entre os tempos de cura e teores de cimento torna necessária uma nova análise de variância, conforme Tabela 4.28. Notou-se que, estatisticamente, o tempo decorrido entre mistura e compactação influenciou significativamente nos valores de resistência, considerando a adição dos teores de estabilizantes anteriormente citados, ao nível de probabilidade de 1%. Avaliando-se, separadamente, o efeito do tempo de cura, as variações não foram

significativas. Associando-se ambos os tratamentos, observou-se que os períodos nos quais os corpos-de-prova foram curados não influenciaram significativamente as alterações nos valores de resistência, ocorrendo variações somente com os teores avaliados em seus diferentes tempos de cura.

Na Tabela 4.29 mostra-se através do teste de médias (Tukey) a influência da adição do cimento na resistência a compressão simples do solo 1, para os tempos de cura de 7 e 28 dias, ao nível de probabilidade de 5%. Verificou-se que os tratamentos estão sendo significativos nas alterações dos valores de resistência. No tempo de cura de 7 dias notou-se que somente o teor de 3% de cimento influenciou significativamente as alterações nos valores de resistência. Não houve diferença significativa entre os teores de 1% e 2%, sendo que o contraste destes com o teor de 3% de estabilizante foi bastante significativo. Já, para o tempo de cura de 28 dias, observaram-se diferenças não significativas nos valores de resistência entre os teores de 1% e 2% de cimento, e 2% e 3% de cimento. Já entre os teores de 1% e 3% a variação foi significativa. Observa-se, também, que a interação entre os tratamentos não ocasionaram variações significativas nos valores de resistência. Assim, pode-se dizer que o aumento do período de cura não está sendo efetivo nas alterações de resistência quando avalia-se cada teor isoladamente.

Tabela 4.27. Análise fatorial da variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 1-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio, Trat. 1 – adição do estabilizante, Trat. 2 – tempos de cura

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Trat. 1	1	4104	4104	0,528*
Trat. 2	2	1424705	712352,5	91,742**
Trat. 1 x Trat. 2	2	46888	23444	3,019 ^{ns}
Resíduos	24	186353	7764,708	
Total	28	190457	6802,036	

** significativo a 1% de probabilidade

* significativo a 5% de probabilidade

^{ns} não significativo

Tabela 4.28. Análise de variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 1-cimento, sem interação entre os tratamentos, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio, Trat. 1 – adição do estabilizante, Trat. 2 – tempos de cura

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	5	1475696	295139	
Resíduos	24	672908	28038	10,526**
Total	29	2148604	74089,8	

** significativo a 1% de probabilidade

Tabela 4.29. Teste de médias (Tukey) dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 1-cimento, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si

Trat. 1	Trat. 2	\bar{X}	7 dias			28 dias		
			1%	2%	3%	1%	2%	3%
			511,78	755,86	1116,3	520,97	808,81	984,01
7 dias	1%	511,78			*			*
	2%	755,86			*			
	3%	1116,3	*	*		*		
28 dias	1%	520,97			*			*
	2%	808,81						
	3%	984,01	*			*		

* Diferença significativa entre as médias

Nas Figuras 4.21 e 4.22, observam-se os comportamentos das RCNC das misturas solo 2-cal, nos tempos de cura de 7 e 28 dias, respectivamente, bem como a influência do tempo entre mistura e compactação neste parâmetro.

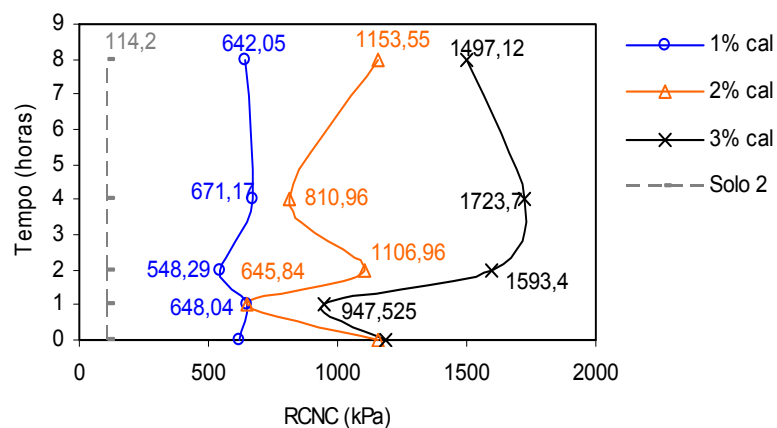


Figura 4.21. Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 2-cal, para o período de cura dos corpos-de-prova de 7 dias.

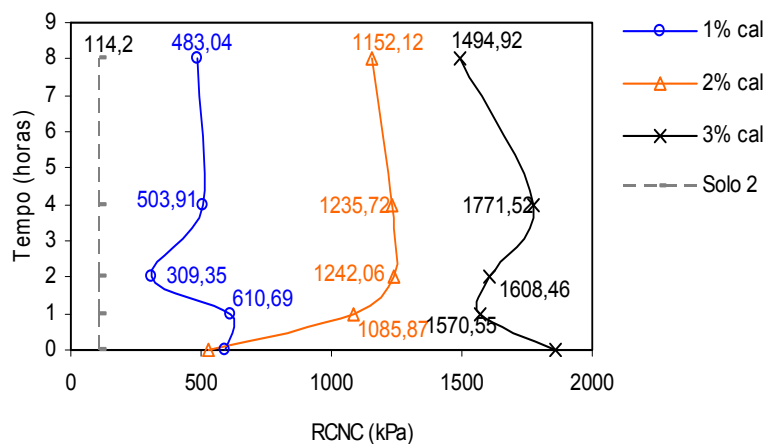


Figura 4.22. Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 2-cal, para o período de cura dos corpos-de-prova de 28 dias.

Na Figura 4.21, verificou-se que houve aumentos expressivos na RCNC das misturas solo 2-cal com acréscimos no teor de cal, no tempo de cura de 7 dias, observando-se crescimentos máximos da ordem de 487%, 910% e 1410%, para os teores de cal de 1, 2 e 3%, respectivamente. Com relação ao efeito do tempo entre mistura e compactação na resistência mecânica das misturas, para fins práticos, não se observou uma tendência definida do comportamento de RCNC, notando-se a ocorrência de valores

máximos para 4 horas, nos teores de cal de 1% e 3%, e para 8 horas, no teor de cal de 2%.

Na Figura 4.22, notou-se a ocorrência de aumentos significativos nos valores de RCNC das misturas solo 2-cal, com o aumento dos teores de estabilizante, para o período de cura de 28 dias, em geral superiores àqueles observados para o período de cura de 7 dias, comportamento este que difere significativamente daquele observado nas misturas solo 1-cal, como se ilustra nas Figuras 4.17 e 4.18. Refere-se que Lima (1981) destaca que as reações pozolânicas entre os solos e a cal nem sempre ocorrem, sendo influenciadas pelas propriedades naturais dos solos, pelos tipos e teores de cal empregados, bem como pelas condições de compactação e de cura das misturas.

Na Tabela 4.30 apresentam-se os resultados da Análise fatorial de Variância, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%, aplicada aos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 2-cal, considerando como tratamentos a adição do estabilizante nos teores de 1%, 2% e 3% e os tempos de cura de 7 e 28 dias, bem como se estabelecendo os tempos entre mistura e compactação como repetições. Na Tabela 4.31 apresenta-se uma nova análise de variância, considerando-se a combinação entres os tratamentos isoladamente, segundo Banzatto e Kronka (2006). Notou-se que, ao nível de probabilidade de 1%, o tempo decorrido entre mistura e compactação influenciou significativamente nos valores de resistência, considerando a adição dos teores de estabilizantes anteriormente citados. Avaliando separadamente o tempo de cura, as variações não foram significativas. Associando-se ambos os tratamentos, observou-se que os períodos nos quais os corpos-de-prova foram curados não influenciaram significativamente as alterações nos valores de resistência, ocorrendo variações somente com os teores avaliados em seus diferentes tempos de cura.

Na Tabela 4.32 mostra-se através do teste de médias (Tukey) a influência da adição de cal na resistência a compressão simples do solo 2, para os tempos de cura de 7 e 28 dias, aos níveis de probabilidade de 1% e

5%. Verificou-se que os tratamentos foram significativos nas alterações dos valores de resistência. No tempo de cura de 7 dias, notou-se que somente o teor de 3% de cimento influenciou significativamente as alterações nos valores de resistência. Não houve diferença significativa entre os teores de 1% e 2%, sendo que o contraste desses teores com o teor de 3% do estabilizante foi bastante significativo. Já para o tempo de cura de 28 dias, notou-se a ocorrência de contrastes significativos das médias dos tratamentos realizados com teores 1%, 2% e 3% de cal, apresentando variações significativas entre si. Nas análises verificadas nas Tabelas 4.29 e 4.32, demonstra-se que o tempo de cura não foi responsável por alterações significativas nos valores de resistência.

Tabela 4.30. Análise fatorial de variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 2-cal, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Trat. 1	1	40602	40602	0,859*
Trat. 2	2	4635625	2317813	49,049**
Trat. 1 x Trat. 2	2	198502	99251	2,100 ^{ns}
Resíduos	24	1134121	47255,04	
Total	28	1174723	41954,39	

** significativo a 1% de probabilidade

* significativo a 5% de probabilidade

^{ns} não significativo

Tabela 4.31. Análise de variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 2-cal, sem interação entre os tratamentos, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	4	4874729	974946	
Resíduos	25	1134121	47255	20,631**
Total	29	6008850	207202	

** significativo a 1% de probabilidade

Tabela 4.32. Teste de médias (Tukey) dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 2-cal, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si

Trat. 1	Trat. 2	\bar{X}	7 dias			28 dias		
			1%	2%	3%	1%	2%	3%
			626,28	974,16	1389,1	500,26	1048,4	1661,6
7 dias	1%	626,28			*			*
	2%	974,16				*		*
	3%	1389,1	*			*		*
28 dias	1%	500,26		*	*		*	*
	2%	1048,4				*		*
	3%	1661,6	*	*		*	*	

* Diferença significativa entre as médias

Nas Figuras 4.23 e 4.24, se apresentam os comportamentos da RCNC das misturas solo 2-cimento, nos tempos de cura de 7 e 28 dias, respectivamente, bem como a influência do tempo entre mistura e compactação neste parâmetro.

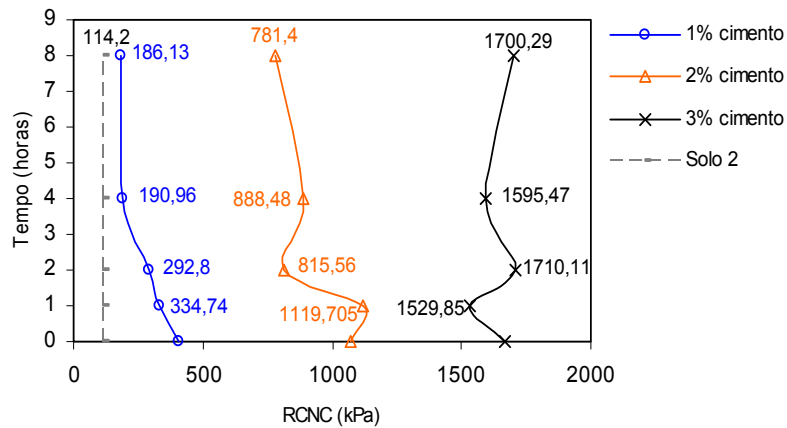


Figura 4.23. Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 2-cimento, para o período de cura dos corpos-de-prova de 7 dias.

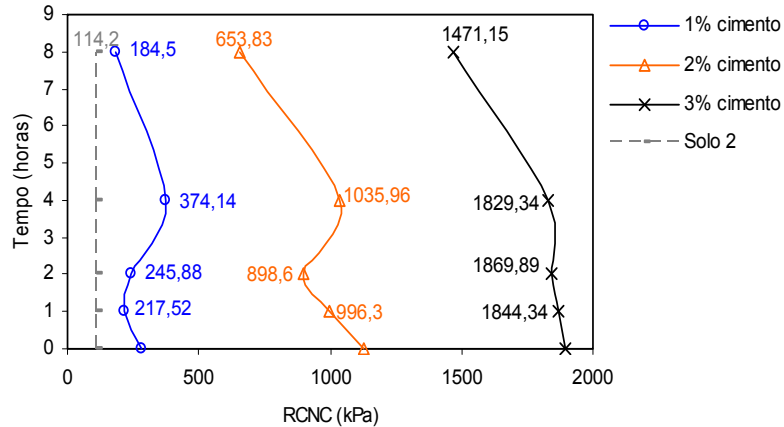


Figura 4.24. Influência do tempo entre mistura e compactação na RCNC das misturas solo 2-cimento, para o período de cura dos corpos-de-prova de 28 dias.

Na Figura 4.23, observou-se à ocorrência de aumento significativo na RCNC das misturas solo 2-cimento, à medida que se aumentaram os teores de cimento; por outro lado, os teores de cimento utilizados mostraram-se menos efetivos quando comparados com os mesmo teores de cal (Figura 4.21), observando-se aumentos máximos da ordem de 250%, 880% e 1397%, nos teores de cimento de 1%, 2% e 3%, respectivamente. Com relação à influência do tempo entre mistura e compactação na resistência mecânica, notou-se que o tempo ótimo foi de 0, 1 e 2 horas, respectivamente, para os teores de cimento de 1%, 2% e 3%.

Na Figura 4.24, verificou-se, também, a ocorrência de taxas elevadas de ganho de RCNC das misturas solo-2 cimento, para o período de cura de 28 dias, à medida que se aumentou o teor de cimento. Com relação à influência do tempo decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica, observou-se a ocorrência de um comportamento relativamente bem definido, com tendência de queda com o aumento do tempo entre mistura e compactação, podendo-se referir a valores máximos de RCNC no tempo de 0 hora, para os teores de cimento de 2% e 3%, com ganhos máximos da ordem de 863% e 1573%, e de 4 horas, para o teor de 1%, com ganho máximo da ordem de 228%. Observou-se a queda dos valores de

resistência mecânica, a partir do tempo de 4 horas, onde, provavelmente, as reações de hidratação e de cimentação de curto prazo foram sendo destruídas pela aplicação da energia de compactação.

Comparando-se os resultados apresentados nas Figuras 4.23 e 4.24, percebeu-se que período de cura de 28 dias produziu aumentos mais significativos nos valores de RCNC, em especial nos teores de 1% e 3% de cimento. Vale destacar que, segundo Croft (1967), os solos de características arenosas, que é o caso do solo 2, respondem melhor à estabilização com cimento, sendo que isto ocorre porque os minerais argilosos do mesmo, ao reagirem com a cal formada na hidratação dos compostos do cimento, ocasionam uma queda no pH da mistura, que afeta benéficamente a hidratação e o endurecimento do cimento.

Na Tabela 4.33 apresentam-se os resultados da Análise fatorial de Variância, aos níveis de probabilidade de 1% e 5%, aplicada aos valores de resistência a compressão simples das misturas solo 2-cal, considerando como tratamentos a adição do estabilizante nos teores de 1%, 2% e 3% e os tempos de cura de 7 e 28 dias, bem como se estabelecendo os tempos entre mistura e compactação como repetições. Na Tabela 4.34 realizou-se uma nova análise de variância, considerando-se a combinação entres os tratamentos isoladamente (7 dias x 1%, 7 dias x 2%, 7 dias x 3%, 28 dias x 1%, 28 dias x 2% e 28 dias x 3%), devido a não interação entre os tempos de cura e teores de cimento. Notou-se na Tabela 4.34, que, ao nível de 1% de probabilidade, o tempo decorrido entre mistura e compactação influenciou significativamente nos valores de resistência, considerando a adição dos teores de estabilizantes anteriormente citados. Avaliando-se separadamente o tempo de cura, as variações não foram significativas. Associando-se ambos os tratamentos, observou-se que os períodos nos quais os corpos-de-prova foram curados não influenciaram significativamente as alterações nos valores de resistência mecânica, ocorrendo variações somente com os teores avaliados em seus diferentes tempos de cura.

Na Tabela 4.35, mostra-se, através do teste de médias (Tukey), a influência da adição de cimento na resistência a compressão simples do solo

2, para os tempos de cura de 7 e 28 dias, ao nível de probabilidade de 5%. Verificou-se que os tratamentos foram significativos nas alterações dos valores de resistência mecânica. Para ambos os tempos de cura, notou-se a ocorrência de contrastes significativos das médias dos tratamentos realizados com teores 1%, 2% e 3% de cal, apresentando variações significativas entre si. Nota-se, também, que o aumento do tempo de cura até 28 dias não foi suficiente para provocar variação significativa nos valores de resistência para cada teor analisado.

Tabela 4.33. Análise fatorial da variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 2-cimento, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Trat. 1	1	13229	13229	0,743*
Trat. 2	2	10387920	5193960	291,597**
Trat. 1 x Trat. 2	2	37785	18892,5	1,061 ^{ns}
Resíduos	24	427491	17812,13	
Total	28	440720	15740	

** significativo a 1% de probabilidade

* significativo a 5% de probabilidade

^{ns} não significativo

Tabela 4.34. Análise de variância dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 2-cimento, sem interação entre os tratamentos, para os níveis de probabilidade de 1% e 5%, onde: F.V. – Fator de Variância, G.L. – grau de liberdade, S.Q. – Soma dos quadrados, Q.M. – Quadrado médio

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	4	10440734	2088147	117,232**
Resíduos	25	427491	17812	
Total	29	10868225	2105959	

** significativo a 1% de probabilidade

Tabela 4.35. Teste de médias (Tukey) dos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas solo 2-cimento, para um nível de probabilidade de 5%, onde: \bar{X} – médias das repetições para cada tratamento; e as médias seguidas de pelo menos uma letra, não diferem entre si

Trat. 1	Trat. 2	\bar{X}	7 dias			28 dias		
			1%	2%	3%	1%	2%	3%
			282,56	934,94	1641,2	260,27	942,31	1782,1
	1%	282,56		*	*		*	*
7 dias	2%	934,94	*		*	*		*
	3%	1641,2	*	*		*	*	
	1%	260,27		*	*		*	*
28 dias	2%	942,31	*		*	*		*
	3%	1782,1	*	*		*	*	

* Diferença significativa entre as médias

4.4. PROPRIEDADES QUÍMICAS DOS SOLOS E MISTURAS

As propriedades químicas dos materiais utilizados na estabilização química dos solos devem ser conhecidas, uma vez que auxiliam no entendimento dos mecanismos de reações responsáveis pelas alterações nas propriedades dos solos.

Dentro do contexto geotécnico, esses experimentos são conduzidos, por exemplo, com o intuito de se analisar o grau de intemperismo dos solos, barreiras de contaminação em estudos de geotecnia ambiental e potencial de reação dos solos na estabilização química para fins rodoviários.

Nas Tabelas 4.36 e 4.37, mostram-se os resultados das caracterizações químicas das amostras dos solos 1 e 2 e de suas misturas com cal e cimento, respectivamente, para o tempo de cura de 7 dias. Já, nas Tabelas 4.38 e 4.39, apresentam-se esses resultados, para o tempo de cura de 28 dias.

Tabela 4.36. Resultados das análises químicas das misturas do solo 1 com cal e cimento, para o período de cura de 7 dias, sendo: pH – potencial hidrogeniônico; ΔpH – diferença entre pH em KCl e pH medido em H₂O; PCZ – ponto de carga zero; SB - soma de bases trocáveis; t – capacidade de troca catiônica efetiva; T – capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – índice de saturação de bases

Amostra	Propriedades químicas														
	pH		ΔpH	PCZ	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	Fe	SB	t	T	V
	H ₂ O	KCl													
Solo 1	6,76	6,39	- 0,37	6,02	3,5	31	1,15	0	0	0,3	45,9	1,25	1,25	1,6	80
Solo 1 + cal (1%) - 8 hrs	8,33	8,11	- 0,22	7,89	190,1*	13	5,34	0	0	0,6	12,1	6,2	6,2	6,8	91
Solo 1 + cal (2%) – 0 hrs	8,52	8,54	0,02	8,56	-	28	7	0	0	0	16,1	7,07	7,07	7,1	100
Solo 1 + cal (3%) – 1 hrs	10,90	10,76	- 0,15	10,6	6,8	8	7,1	0	0	0	14	7,15	7,15	7,2	100
Solo 1 + cimento (1%) – 2 hrs	8,62	8,39	- 0,23	8,16	6,4	100	5,94	0	0	0	48,5	6,23	6,23	6,2	100
Solo 1 + cimento (2%) – 2 hrs	8,55	8,43	- 0,12	8,31	14,5	130	6,01	0	0	0	96,7	6,4	6,4	6,4	100
Solo 1 + cimento (3%) – 2 hrs	8,79	8,72	- 0,07	8,65	26,6	195	6,88	0	0	0	85,9	7,5	7,5	7,5	100

* provável erro de análise

Tabela 4.37. Resultados das análises químicas das misturas do solo 2 com cal e cimento, para o período de cura de 7 dias, sendo: pH – potencial hidrogeniônico; ΔpH – diferença entre pH em KCl e pH medido em H₂O; PCZ – ponto de carga zero; SB - soma de bases trocáveis; t – capacidade de troca catiônica efetiva; T – capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – índice de saturação de bases

Amostra	Propriedades químicas														
	pH		ΔpH	PCZ	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	Fe	SB	t	T	V
	H ₂ O	KCl			mg/dm ³					cmol _c /dm ³					%
Solo 2	6,47	4,25	-2,22	2,03	10,5	59	0,59	0,12	0,5	1	10	0,91	1,39	1,9	48
Solo 2 + cal (1%) - 4 hrs	9,28	8,82	-0,46	8,36	11,5	99	5,2	0	0	0	38,70	5,5	5,5	5,5	100
Solo 2 + cal (2%) - 0 hrs	10,40	10,34	-0,09	10,3	9,5	86	5,19	0	0	0	38,00	5,45	5,45	5,5	100
Solo 2 + cal (3%) - 4 hrs	10,70	10,84	0,13	11	10,5	84	6,45	0	0	0	38,10	6,71	6,71	6,7	100
Solo 2 + cimento (1%) - 0 hrs	9,57	9,31	-0,26	9,05	31,6	170	4,85	0	0	0	1660	5,44	5,44	5,4	100
Solo 2 + cimento (2%) - 1 hrs	9,93	9,79	-0,14	9,65	44,6	212	6,33	0	0	0	195	11,7	11,7	12	100
Solo 2 + cimento (3%) - 2 hrs	9,95	9,89	-0,06	9,83	28,6	195	6,33	0	0	0	166	6,95	6,95	7	100

Tabela 4.38. Resultados das análises químicas das misturas do solo 1 com cal e cimento, para o período de cura de 28 dias, sendo: pH – potencial hidrogeniônico; ΔpH – diferença entre pH em KCl e pH medido em H₂O; PCZ – ponto de carga zero; SB - soma de bases trocáveis; t – capacidade de troca catiônica efetiva; T – capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – índice de saturação de bases.

Amostra	Propriedades químicas														
	pH		ΔpH	PCZ	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	Fe	SB	t	T	V
	H ₂ O	KCl													
Solo 1	6,76	6,39	- 0,37	6,02	3,5	31	1,15	0	0	0,3	45,9	1,25	1,25	1,6	80
Solo 1 + cal (1%) - 8 hrs	8,39	8,32	- 0,07	8,25	2,4	13	5,9	0	0	0	24,4	5,94	5,94	5,9	100
Solo 1 + cal (2%) - 8 hrs	8,38	8,47	0,09	8,56	12,7	24	6,61	0	0	0	13,8	6,73	6,73	6,7	100
Solo 1 + cal (3%) - 4 hrs	8,68	8,67	- 0,01	8,66	6,7	25	8,85	0	0	0	16,3	8,94	8,94	8,9	100
Solo 1 + cimento (1%) - 2 hrs	8,86	8,75	- 0,11	8,64	3,5	102	5,36	0	0	0	75,3	5,64	5,64	5,6	100
Solo 1 + cimento (2%) - 2 hrs	8,88	8,89	0,01	8,9	5,5	121	5,91	0	0	0	61,5	6,24	6,24	6,2	100
Solo 1 + cimento (3%) - 2 hrs	8,98	8,94	- 0,04	8,9	11,5	161	7,05	0	0	0	90,3	7,51	7,51	7,5	100

Tabela 4.39. Resultados das análises químicas das misturas do solo 2 com cal e cimento, para o período de cura de 28 dias, sendo: pH – potencial hidrogeniônico; ΔpH – diferença entre pH em KCl e pH medido em H₂O; PCZ – ponto de carga zero; SB - soma de bases trocáveis; t – capacidade de troca catiônica efetiva; T – capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – índice de saturação de bases.

Amostra	Propriedades químicas														
	pH		ΔpH	PCZ	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	Fe	SB	t	T	V
	H ₂ O	KCl			mg/dm ³			cmol _c /dm ³					%		
Solo 2	6,47	4,25	-2,22	2,03	10,5	59	0,59	0,12	0,5	1	10	0,91	1,39	1,9	48
Solo 2 + cal (1%) - 1 hrs	9,71	9,36	-0,35	9,01	7,5	63	4,39	0	0	0	42	4,58	4,58	4,6	100
Solo 2 + cal (2%) - 2 hrs	10,5	10,57	0,09	10,7	7,5	55	5,45	0	0	0	21,4	5,62	5,62	5,6	100
Solo 2 + cal (3%) - 2 hrs	10,5	10,4	-0,08	10,3	13,5	61	6,01	0	0	0	32,1	6,23	6,23	6,2	100
Solo 2 + cimento (1%) - 4 hrs	9,46	9,23	-0,23	9	17,5	134	4,35	0,02	0	0	183	4,79	4,79	4,8	100
Solo 2 + cimento (2%) - 0 hrs	9,73	9,51	-0,22	9,29	25,6	89	4,95	0	0	0	182	5,29	6,16	5,3	100
Solo 2 + cimento (3%) - 0 hrs	10	9,86	-0,14	9,72	24,6	192	24,8	0	0	0	154	25,4	25,4	25	100

Segundo os dados apresentados nas Tabelas 4.36 e 4.37, os valores de pH medidos em água dos solos 1 e 2 foram, respectivamente, 6,76 e 6,47, sendo classificados como moderadamente ácidos, de acordo com terminologia referida por Guimarães (1997). Destaca-se que os valores de pH dos solos, em geral, situaram-se entre 4 e 7, sendo que números abaixo desta faixa indicaram a presença de ácidos livres, enquanto que acima refletiram a ocorrência de solos salinos ou calcários, em concordância com Raij et al. (1987). Os valores de capacidade de troca catiônica dos solos 1 e 2 foram, relativamente, baixos e compatíveis com a mineralogia das suas frações argila, predominantemente compostas por caulinita e óxidos de ferro e de alumínio. Refere-se que esses são minerais secundários com, respectivamente, valores de CTC entre 3 e 15 cmolc/kg (GUIMARÃES, 1971) e 2 e 4 cmolc/kg (MEURER, 2006). Com relação aos valores da porcentagem de saturação de bases, os solos 1 e 2 apresentaram valores menores que 80%. De acordo com Brady & Weil (1999), solos de regiões tropicais úmidas, em que predominam argilas silicatadas, são ácidos quando esse valor é menor do que 80%. Os valores de acidez potencial (H + Al) dos solos 1 e 2 foram, respectivamente, 0,3 e 1, ou seja, apresentaram relação inversa com os valores de pH, mostrando que a acidez potencial e, conseqüentemente, a soma dos compostos de hidrogênio e de alumínio influenciou nas medidas dos seus valores de pH.

Brady e Weil (1999) relatam que são complexos os fatores responsáveis pela acidez do solo, pois, ao mesmo tempo, existem dois grupos de elementos dominantes que exercem influência significativa, ou seja, o alumínio e o hidrogênio favorecem a ocorrência de acidez, enquanto que os outros cátions, na sua maioria, a neutralizam.

Nas Tabelas 4.36 a 4.39, mostra-se que com a adição dos estabilizantes químicos, os solos apresentaram aumentos significativos nos valores das seguintes propriedades químicas: pH; soma de bases trocáveis (SB), principalmente devido ao aumento de íons de Ca^{2+} ; capacidade de troca catiônica; e índice de saturação de bases. Por outro lado, houve expressivas reduções nas quantidades de hidrogênio livre e de alumínio e,

conseqüentemente, na acidez potencial (H+Al), que se tornou nula assim que se adicionaram os estabilizantes analisados aos solos. Portanto, a incorporação dos estabilizantes químicos aos solos proporcionou um aumento na saturação de bases e um consumo total dos íons H^+ e Al^{3+} trocáveis, gerando modificações nos seus valores de pH do solo, passando de ácidos para alcalinos. Para os solos 1 e 2, as diferenças entre os valores de pH determinado em solução de KCl 1mol/L e daquele medido em H_2O foram, respectivamente, de -0,37 e -2,22, indicando a predominância de cargas elétricas variáveis. Os valores da capacidade de troca catiônica dos solos 1 e 2 foram, respectivamente, 1,25 e 1,39 cmolc/kg. Esses valores podem ser considerados relativamente baixos e compatíveis com a mineralogia de suas frações argila, que se mostraram, predominantemente, compostas por caulinita e óxidos de ferro e de alumínio, segundo Trindade (2006). As estimativas dos Pontos de Carga Zero (PCZ) para os solos 1 e 2, obtidas pela diferença entre o dobro do pH mensurado em KCl e o pH medido em água, para cada solo, foram, respectivamente, de 6,02 e 2,03. Segundo Trindade (2006), os solos tropicais cauliniticos e oxídicos, como os estudados nesse trabalho, possuem cargas variáveis, as quais se manifestam a partir da protonação e desprotonação dos colóides. Acredita-se que a predominância de minerais cauliniticos, bem como a falta de minerais oxídicos, fez com que o solo 2 apresentasse valor baixo de PCZ.

Dentre as características químicas presentes neste trabalho, o pH tem sido a mais usada no estudo da estabilização química dos solos. Segundo Rogers e Glendinning (2000)¹³, citados por Lovato (2004), mudança que venha ocorrer nos valores de pH de misturas, resultando em valores suficientemente elevados, provocam a dissolução parcial da sílica e da alumina, seguida da formação de novos minerais silicatados e aluminatos, que, quando cimentados, conferem aumento na resistência mecânica dos solos. Nas Tabelas 4.36 a 4.35, observou-se que ocorreram aumentos significativos nos valores de pH, nos teores de cal e de cimento de 2 e 3%, que se relacionaram às elevadas concentrações dos íons cálcio

¹³ ROGERS, C.D.F.; GLENDINNING, S. Lime Requirement for Stabilization. In: **Transportation Research Board**. 79th Annual Meeting, Washington, D.C., 2000.

fornecidas pelos estabilizantes e às reduções na acidez potencial. Assim, o aumento do pH dos solos ocorreu devido à liberação de sítios de troca originalmente ocupados por hidrogênio e/ou alumínio, após a adição de teores crescentes de cal e cimento, tendo este processo resultado na possível precipitação do alumínio e na diminuição da acidez potencial.

A partir dos resultados de PCZ apresentados nas Tabelas 4.36 a 4.39, verificou-se que ocorrem aumentos nos valores de PCZ com aumentos nos teores de cal e de cimento, chegando-se a quantitativos maiores com teores maiores de estabilizantes, assim como ocorreu com os valores de pH e de capacidade de troca catiônica dos solos. Semelhantemente ao comportamento observado nos solos não tratados, os valores de PCZ determinados para as misturas foram inferiores àqueles de pH em H₂O, evidenciando, pois, o predomínio de carga variável negativa nos colóides das misturas.

Com relação à influência do tempo de cura nas características químicas dos solos e misturas, nas Tabelas 4.36 a 4.39, pode-se verificar que não houve alterações significativas, para ambos os solos estudados e suas respectivas misturas.

Na Tabela 4.36 observa-se níveis elevadíssimos de sódio nas amostras analisadas no tempo ótimo da mistura do solo 1 com 1% de cal. Como dificilmente verifica-se tal concentração de sódio em latossolos, e a adição de Ca²⁺ tende a reduzir os níveis de sódio pela preferência no sítio de troca das partículas de argila, é provável que tal fato esteja associado a erros de análises em laboratório.

4.5. RESULTADOS DAS ANÁLISES MINERALÓGICAS

4.5.1. Resultados da análise da formação de produtos amorfos

Alguns trabalhos relacionados à formação de novos minerais em solos estabilizados quimicamente são encontrados na literatura, como por

exemplo, Bauer & Carvalho (1990), que analisaram a possível formação de minerais silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio hidratados em solos estabilizados com cal. Porém, aos níveis nacional e internacional há carência expressiva ou, quase, inexistência de publicações sobre a formação de novos minerais, no contexto de solos modificados com cal e com cimento. Com relação a esse tópico, destaca-se que a verificação da presença de minerais na fase amorfa em misturas solo-cal e solo-cimento possibilita prever o processo de formação de novos minerais.

Nas Tabelas 4.40 e 4.41, mostram-se os resultados dos ataques seqüenciais realizados no solo 1 e em suas misturas com cal e com cimento, para a quantificação dos minerais amorfos de Si, Al, Ca, Mg e Fe, bem como nas Figuras 4.25 a 4.34 apresentam-se as curvas de extração das fases amorfas dos minerais silício, alumínio, cálcio, magnésio e ferro, para os períodos de cura de 7 e 28 dias, seguindo-se as seguintes etapas: (i) primeira extração, que foi efetuada com $BaCl_2$, identificando-se os elementos nas formas trocáveis; e (ii) segunda e terceira extrações, que foram realizadas com o uso do oxalato e do NaOH, respectivamente, para a identificação de produtos amorfos. Refere-se que o oxalato de amônio é um complexante usado para se determinar teores de minerais de elementos metálicos ainda nas formas menos cristalinas, principalmente de óxidos de ferro, cuja complexação é dificultada pelas suas peculiaridades químicas. Já, o NaOH é utilizado, basicamente, para elevar o pH da solução, com a finalidade de desestabilizar as condições de equilíbrio de minerais de Si e Al, enfraquecendo ainda mais as estruturas mal formadas, podendo-se, assim, quantificar os amorfos. Nas Figuras 4.25 e 4.26, ilustram-se as curvas com as quantidades de silício extraído do solo 1 e de suas misturas, para cada solução utilizada e para os tempos de cura de 7 e 28 dias, destacando-se que foram ensaiadas as amostras obtidas nos tempos decorridos entre mistura e compactação que apresentaram maiores valores de resistência mecânica.

Tabela 4.40. Resultados dos ataques seqüenciais para quantificação de amorfos das misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias

Amostra	Elemento	Quantidade (mg/kg)		
		1 ^a (BaCl ₂)	2 ^a (Oxalato)	3 ^a (NaOH)
Solo 1	Si	6,344	27,979	500,637
	Al	0,101	5,398	0,000
	Fe	0,097	2,435	0,003
	Ca	14,729	1,260	0,000
	Mg	0,000	1,131	0,038
Solo 1 + cal (1%) - 8 horas	Si	0,000	341,120	542,279
	Al	1,466	120,300	8074,660
	Fe	1,057	36,906	3,701
	Ca	2412,194	1,367	0,000
	Mg	0,000	9,853	0,000
Solo 1 + cal (2%) - 0 horas	Si	0,000	824,370	1045,979
	Al	539,708	2114,584	4958,245
	Fe	0,107	770,862	2,230
	Ca	3817,530	37,890	0,000
	Mg	0,000	130,363	0,000
Solo 1 + cal (3%) - 1 horas	Si	0,000	1430,734	1646,340
	Al	571,656	2378,637	6536,448
	Fe	0,103	576,082	1,115
	Ca	3858,502	18,400	0,000
	Mg	0,000	126,249	0,000
Solo 1 + cimento (1%) – 2 horas	Si	0,000	661,530	1461,018
	Al	50,231	1095,056	0,000
	Fe	2,307	434,063	1,007
	Ca	2060,758	26,393	53,047
	Mg	0,000	114,469	0,643
Solo 1 + cimento (2%) – 2 horas	Si	0,000	2665,608	2957,400
	Al	2,846	132,110	495,764
	Fe	0,070	47,482	0,050
	Ca	310,263	13,639	11,072
	Mg	0,000	19,394	0,869
Solo 1 + cimento (3%) - 2 horas	Si	0,000	3491,693	1725,401
	Al	6,426	96,917	309,784
	Fe	0,000	27,991	0,000
	Ca	350,852	8,412	0,000
	Mg	0,000	19,015	0,000

Tabela 4.41. Resultados dos ataques seqüenciais para quantificação de amorfos das misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias

Amostra	Elemento	Quantidade (mg/kg)		
		1 ^a (BaCl ₂)	2 ^a (Oxalato)	3 ^a (NaOH)
Solo 1	Si	6,344	27,979	500,637
	Al	0,101	5,398	0,000
	Fe	0,097	2,435	0,003
	Ca	14,729	1,260	0,000
	Mg	0,000	1,131	0,000
Solo 1 + cal (1%) - 8 horas	Si	475,194*	206,820	39,860
	Al	14,682	690,921	2201,486
	Fe	0,024	274,553	0,155
	Ca	1316,771	23,256	57,375
	Mg	0,000	61,359	1,036
Solo 1 + cal (2%) - 0 horas	Si	0,000	564,116	1567,175
	Al	354,675	997,108	6014,827
	Fe	0,000	311,638	40,957
	Ca	2408,476	16,195	0,000
	Mg	0,000	72,833	0,205
Solo 1 + cal (3%) - 1 horas	Si	0,000	1583,327	2118,784
	Al	14,600	169,100	420,483
	Fe	0,015	23,687	0,438
	Ca	498,488	13,379	0,000
	Mg	0,000	11,188	0,581
Solo 1 + cimento (1%) – 2 horas	Si	0,000	2326,106	2256,530
	Al	4,071	101,283	449,833
	Fe	0,038	33,820	0,260
	Ca	366,356	17,623	0,000
	Mg	0,000	14,703	0,000
Solo 1 + cimento (2%) – 2 horas	Si	0,000	2676,696	979,802
	Al	4,808	149,081	328,594
	Fe	0,298	57,781	0,152
	Ca	337,603	14,343	0,000
	Mg	0,000	19,263	0,000
Solo 1 + cimento (3%) - 2 horas	Si	0,000	3476,827	947,533
	Al	6,889	189,457	277,474
	Fe	0,010	72,884	0,000
	Ca	400,448	13,290	0,000
	Mg	0,000	26,801	0,000

* provável erro de análise

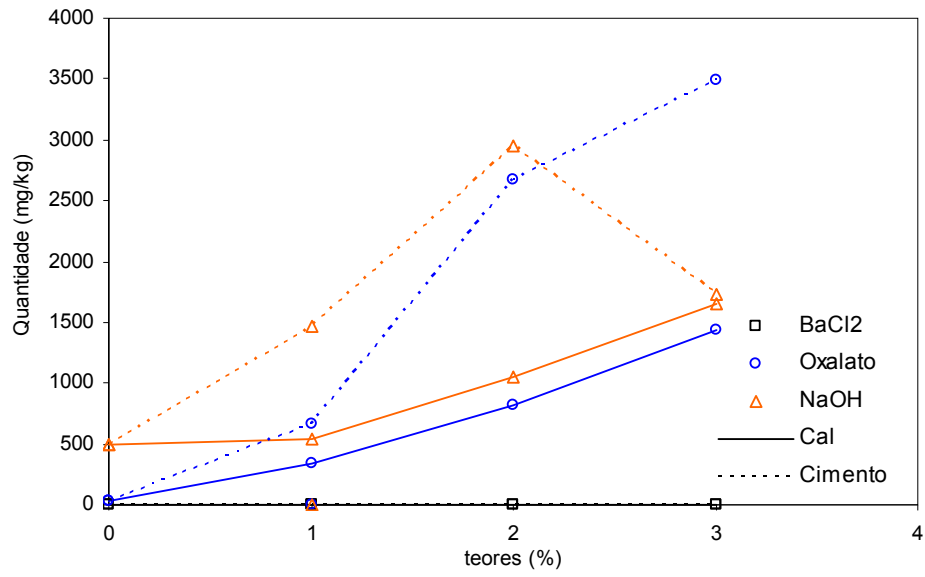


Figura 4.25. Curva de extração de Si amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.

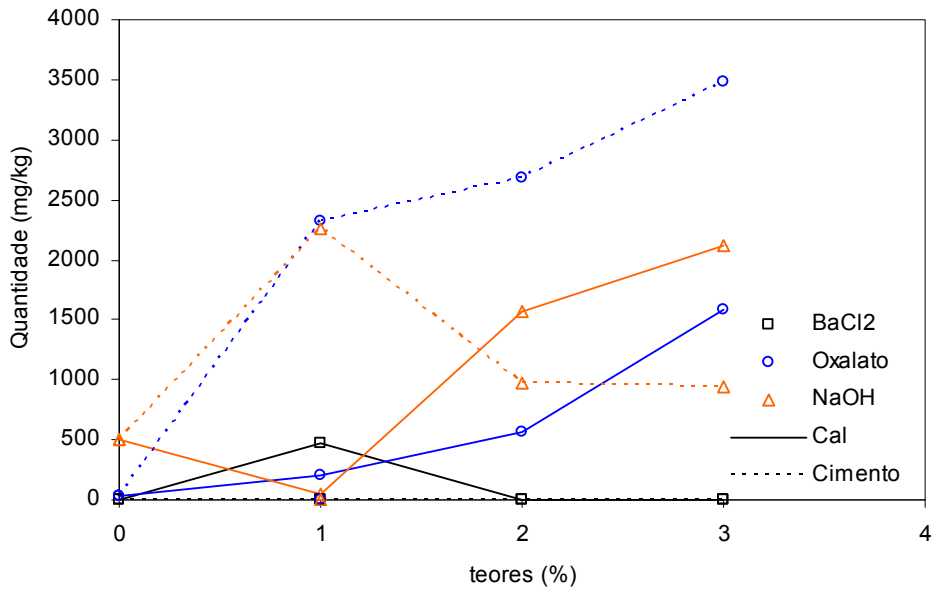


Figura 4.26. Curva de extração de Si amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.

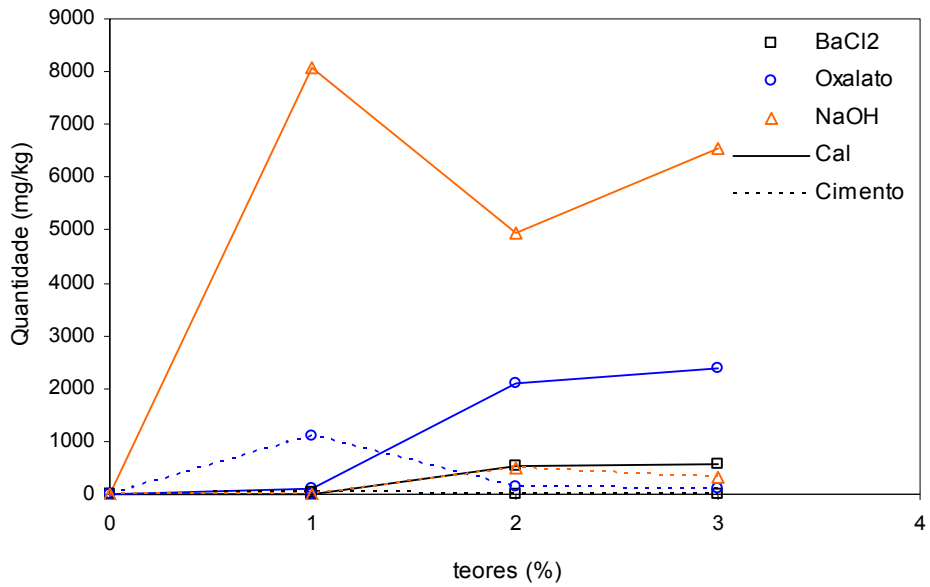


Figura 4.27. Curva de extração de Al amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.

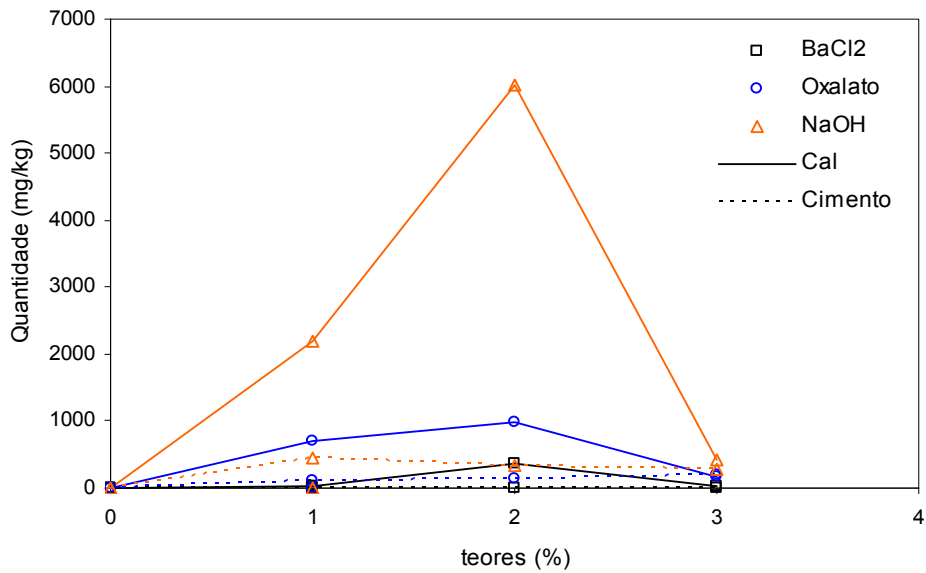


Figura 4.28. Curva de extração de Al amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.

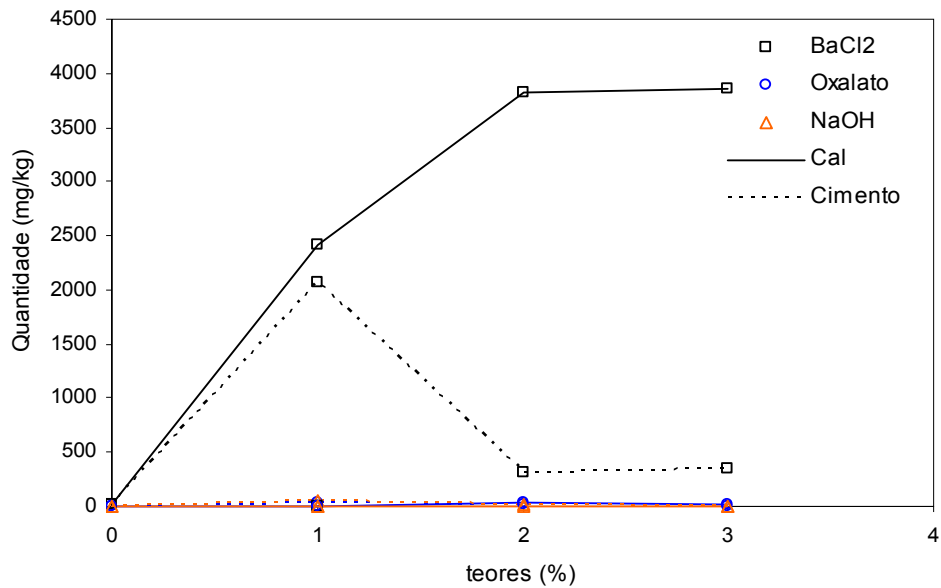


Figura 4.29. Curva de extração de Ca^{2+} trocável para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.

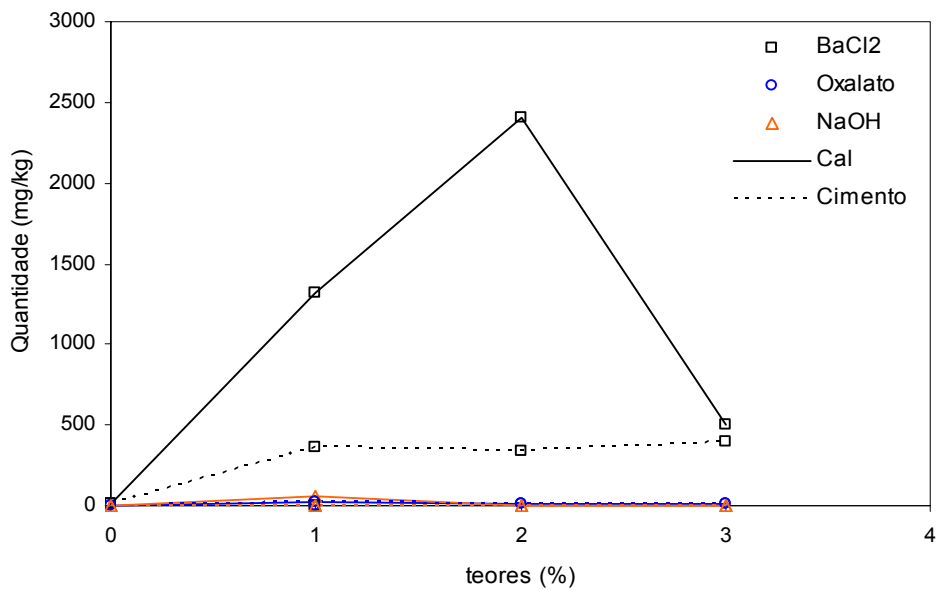


Figura 4.30. Curva de extração de Ca^{2+} trocável para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.

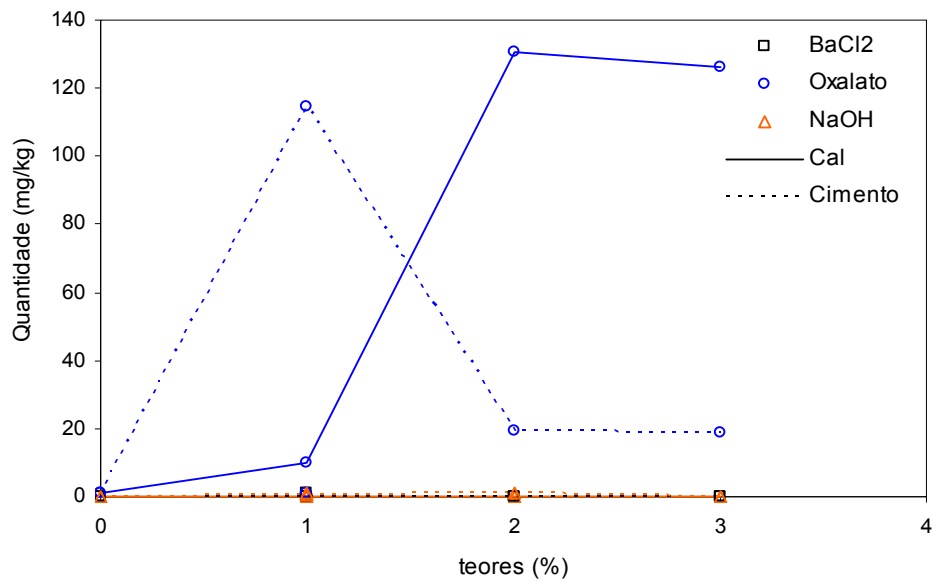


Figura 4.31. Curva de extração de Mg amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.

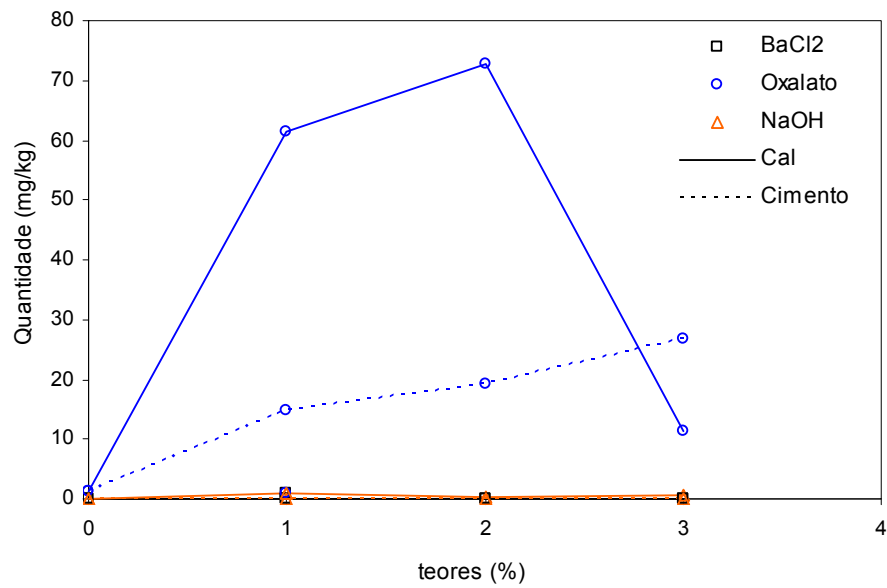


Figura 4.32. Curva de extração de Mg amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.

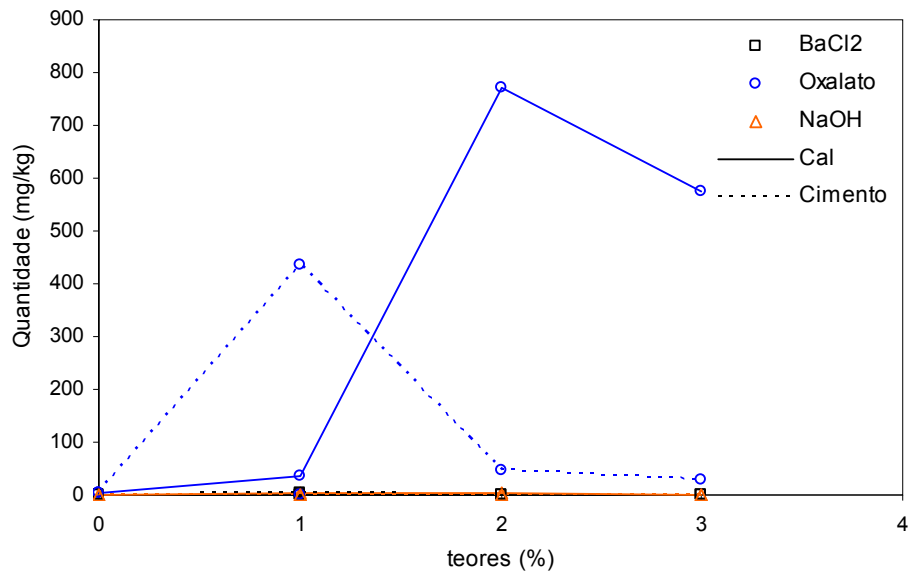


Figura 4.33. Curva de extração de Fe amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.

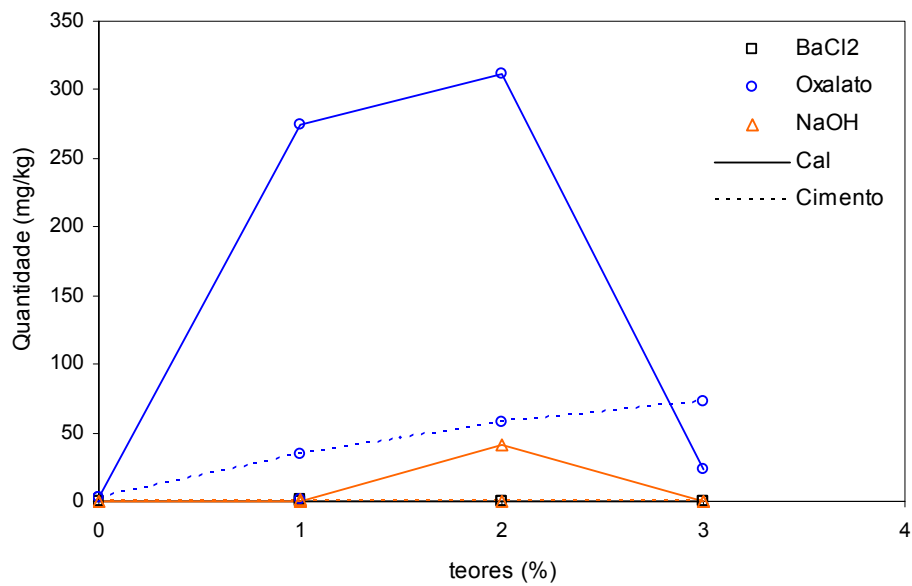


Figura 4.34. Curva de extração de Fe amorfos para misturas do solo 1 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.

Nas Tabelas 4.40 e 4.41, referentes ao solo 1, observou-se a presença de Si na forma trocável, com quantidades de 6,344 mg/kg, sendo que na forma amorfa teve-se valores de 27,979 mg/kg e 500,637 mg/kg em solução de oxalato e de NaOH, respectivamente. Esses valores foram usados como parâmetros de comparação com as quantidades obtidas nas misturas. A estabilização do solo 1 com a cal favoreceu a formação de amorfos, que puderam ser observados através de aumentos nas quantidades do Si extraídos pelo oxalato e NaOH. Houve a tendência de aumento de minerais amorfos com os teores de cal, como pode ser visualizado nas curvas da Figura 4.25. Vale destacar a ocorrência de aumentos significativos, nos teores de 2% e 3% de cal. Para o período de cura de 28 dias, Figura 4.26, de modo geral, ocorreu um conjunto de alterações pouco significativas nas quantidades de minerais amorfos de Si extraídos com o uso do oxalato, quando comparado com o tempo de cura de 7 dias. Por outro lado, houve aumentos nos produtos amorfos de Si extraídos com NaOH, podendo-se deduzir que o tempo de 28 dias não foi suficiente para a cristalização dos minerais, onde as reações pozolânicas ainda estavam se processando. Para a mistura do solo 1 com o teor de 1% de cal, ocorreu uma queda bastante expressiva na quantidade de Si extraída com NaOH, no período de cura de 28 dias, o que pode estar associado com algum erro na determinação. Já, as misturas do solo 1 com cimento apresentaram maiores quantidades de produtos amorfos do que as misturas solo-cal, uma vez que o cimento é essencialmente formado por silicatos e aluminatos, sendo que as reações se processaram mais rapidamente. Observou-se, também, na Figura 4.25, aumento nas quantidades de Si extraídos com NaOH, até o teor de 2% de cimento, seguido de uma queda para o teor de 3%. Quantidades expressivas de Si foram encontradas quando extraídas com oxalato. Na Figura 4.26, observou-se que, comparativamente ao tempo de cura de 7 dias, no período de cura 28 dias obteve-se maiores quantidades de minerais amorfos de Si para o teor de 1% de cimento. Por outro lado, os teores de 2 e 3% de cal favoreceram a cristalização, ocasionando pequenas reduções destas quantidades. Destaca-se que, segundo Croft (1967), a adição de cimento em solos argilosos que reagem com a cal formada na hidratação dos compostos do

cimento ocasiona uma queda no pH da mistura, que afeta a sua hidratação e endurecimento. Certamente, isso pode ter interferido na cristalização dos produtos da hidratação do cimento, mantendo os minerais na fase amorfa.

Observou-se na Tabela 4.41 e na Figura 4.26, valores de silício na forma trocável nas amostras do solo 1 com 1% de cal, quando curadas durante 28 dias. Como dificilmente encontramos silício na forma trocável na solução de solo, possivelmente deve ter ocorrido erro na realização da primeira extração para esse caso.

Nas Tabelas 4.40 e 4.41, mostraram-se, também, as quantidades de produtos amorfos e trocáveis de Al do solo 1 e respectivas misturas, bem como, nas Figuras 4.27 e 4.28, observaram-se, respectivamente, as curvas com as quantidades de alumínio extraído para cada solução utilizada, nas misturas deste solo com cal e com cimento, para os tempos de cura de 7 e 28 dias. No solo 1, encontraram-se quantidades de Al trocável de 0,101 mg/kg e de amorfos extraídos com oxalato de 5,398 mg/kg, não se detectando nenhuma presença de Al na terceira extração realizada. Notaram-se aumentos substanciais nas quantidades de Al com os teores de cal, em especial para os teores de 1% e 2% de cal, tanto na forma trocável como na amorfa, o que identificou a formação de amorfos devido à ocorrência de reações pozolânicas. Refere-se que, segundo Herrin & Mitchell (1961), o produto dessas reações é um gel de silicato e aluminato de cálcio, que tende a cimentar as partículas de solo de maneira similar àquela produzida pela hidratação do cimento Portland. Outro aspecto de interesse foi que a mistura solo 1 com o teor de 1% de cal apresentou maiores quantidades de produtos amorfos de Si extraídos com NaOH, destacando-se a possibilidade de que as reações estivessem ocorrendo mais rapidamente para esse teor. Com o tempo de cura de 28 dias, pode-se observar a ocorrência de quantidades inferiores dos produtos amorfos, quando comparado com os valores observados no período de cura de 7 dias. Tal fato procedeu, pois as reações pozolânicas estavam causando a cimentação e a cristalização dos minerais da fase amorfa.

Para as misturas solo 1-cimento, na Figura 4.27, observou-se a ocorrência de reduções nas quantidades de minerais amorfos de Al extraídas pelo oxalato, com o aumento dos teores de cimento, e aumentos dos produtos extraídos com a solução de NaOH, até o teor de 2% de cimento. Novamente, observou-se que o teor de 1% de cimento apresentou maiores quantidade de produtos de Al quando extraídos com oxalato, bem como se percebeu que, com o aumento do tempo de cura (Figura 4.28), houve queda nos valores dos minerais amorfos de Al extraídos com oxalato e NaOH passíveis de cristalização, quantidades estas até menores do que a apresentada pelo solo. Notou-se que, para o tempo de cura de 28 dias, o teor de 2% de cimento apresentou maiores valores de amorfos, trazendo à tona a possibilidade de que a velocidade das reações dependesse do teor de estabilizante empregado.

Nas Figuras 4.29 e 4.30, ilustraram-se os comportamentos das curvas das quantidades de cálcio extraído para cada solução utilizada, nas misturas do solo 1 com cal e com cimento, nos tempo de cura de 7 e 28 dias, respectivamente. O solo 1 apresentou em sua composição 14,729 mg/kg de Ca trocável, 1,26 mg/kg de amorfos extraídos pelo oxalato e nenhuma quantidade de amorfos extraída pelo NaOH. Nas suas misturas, verificou-se a ocorrência de grandes quantidades extraídas pelo BaCl₂, o que representou Ca²⁺ na forma trocável, e quantidades insignificantes na forma amorfa, para ambos estabilizantes estudados.

Dos resultados apresentados nas Tabelas 4.40 e 4.41, vale destacar que o solo 1 não apresentou na sua composição Mg e Fe nas formas trocáveis, mas exibiu os quantitativos 1,131 mg/kg e 2,435 de amorfos de Mg e Fe extraídos com oxalato, respectivamente, e nenhum valor de amorfos extraídos com NaOH.

Nas Figuras 4.31 e 4.32, mostraram-se os comportamentos das curvas elaboradas com as quantidades de Mg extraídas, para cada uma das soluções utilizadas, para o solo 1 e suas misturas com cal e cimento, nos períodos de cura de 7 e 28 dias, respectivamente. Vale destacar a ocorrência de aumentos nas quantidades de Mg extraídas pelo oxalato, com

o aumento dos teores de cal. Já, para o extrator NaOH não ocorreram alterações nos valores. Cabe salientar que foram identificados produtos amorfos de Mg, mas em quantidades pequenas, porém maiores do que aquelas de produtos amorfos de Ca. Comparativamente com o tempo de cura de 28 dias, ocorreram diminuições nas quantidades de produtos extraídos com oxalato, bem como houve o aparecimento de pequenas quantidades de amorfos extraídos com NaOH, salientando-se novamente o teor de 1% de cal. Isso pode estar ocorrendo devido à composição da cal ter apresentado pequenas porcentagens de hidróxido de magnésio, que também participaram das reações pozolânicas.

Nas Figuras 4.33 e 4.34, apresentaram-se os comportamentos das curvas elaboradas com as quantidades de Fe extraídas para cada uma das soluções utilizadas, para o solo 1 e suas misturas com cal e com cimento, nos períodos de cura de 7 e 28 dias, respectivamente. Notou-se a ocorrência de aumentos consideráveis de Fe na fase amorfa, à medida que se aumentou o teor de cal. O aumento do tempo de cura ocasionou a cristalização de uma parte dos minerais amorfos de Fe, o que causa diminuição nas quantidades de Fe extraído pela solução de oxalato, em comparação com o tempo de cura de 7 dias. Nas misturas solo 1-cimento, observou-se a diminuição das quantidades de minerais amorfos de Fe com os teores de cimento, destacando-se o valor obtido para 1% de estabilizante. Para o período de cura de 28 dias, notou-se a diminuição dos compostos amorfos de Fe, em relação ao quantitativo de 7 dias, provavelmente, devido ao fato de estar ocorrendo a cristalização destes amorfos. Diferentemente do comportamento que se observou para o período de cura de 7 dias, o aumento no teor de cimento provocou aumento na quantidade de minerais amorfos de Fe. Notou-se que o comportamento das curvas da extração de Mg e Fe, para ambos os tempos de cura assemelharam-se. Com isso pode-se supor que esses minerais estejam juntos como produtos amorfos.

As Tabelas 4.42 e 4.43 trazem os resultados dos ataques seqüenciais realizados no solo 2 e suas misturas com cal e com cimento, para a quantificação dos minerais amorfos de Si, Al, Ca, Mg e Fe, bem como

as Figuras 4.35 a 4.44 apresentam as curvas de extração das fases amorfas dos minerais silício, alumínio, cálcio, magnésio e ferro, para os períodos de cura de 7 e 28 dias.

Tabela 4.42. Resultados dos ataques seqüenciais para quantificação de amorfos das misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias

Amostra	Forma amorfa	Quantidade (mg/kg)		
		1 ^a (BaCl ₂)	2 ^a (Oxalato)	3 ^a (NaOH)
Solo 2	Si	0,000	0,237	446,359
	Al	1,242	2,630	0,000
	Fe	0,000	1,029	0,000
	Ca	5,903	0,000	0,000
	Mg	1,248	0,039	0,000
Solo 2 + cal (1%) - 4 hrs	Si	0,000	1803,749	1476,400
	Al	8,058	84,975	44,119
	Fe	0,000	9,775	10,365
	Ca	198,671	9,795	4,955
	Mg	0,000	14,889	6,663
Solo 2 + cal (2%) - 0 hrs	Si	0,000	3785,298	897,892
	Al	7,358	146,893	42,223
	Fe	0,000	15,045	0,000
	Ca	414,679	8,569	0,000
	Mg	0,000	15,503	0,000
Solo 2 + cal (3%) - 4 hrs	Si	0,000	4604,248	905,967
	Al	5,518	197,786	49,747
	Fe	0,000	24,432	0,103
	Ca	604,367	10,812	0,000
	Mg	0,000	23,079	0,000
Solo 2 + cimento (1%) - 0 hrs	Si	27,878	758,106	693,244
	Al	1,099	83,526	47,681
	Fe	0,173	20,825	0,346
	Ca	126,617	6,911	8,559
	Mg	0,000	16,817	1,130
Solo 2 + cimento (2%) - 1 hrs	Si	0,000	1147,835	560,890
	Al	3,939	45,426	0,000
	Fe	0,000	13,023	0,010
	Ca	271,946	2,185	0,014
	Mg	0,000	10,161	0,000
Solo 2 + cimento (3%) - 2 hrs	Si	4,922	4802,761	671,485
	Al	4,286	38,976	0,000
	Fe	0,000	12,837	0,000
	Ca	329,165	1,807	0,000
	Mg	0,000	7,416	0,000

Tabela 4.43. Resultados dos ataques seqüenciais para quantificação de amorfos das misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias

Amostra	Forma amorfa	Quantidade (mg/kg)		
		1 ^a (BaCl ₂)	2 ^a (Oxalato)	3 ^a (NaOH)
Solo 2	Si	0,000	0,237	446,359
	Al	1,242	2,630	0,000
	Fe	0	1,029	0,000
	Ca	5,903	-0,349	0,000
	Mg	1,248	0,039	0,000
Solo 2 + cal (1%) - 4 hrs	Si	0,000	1393,948	292,439
	Al	7,063	72,407	0,000
	Fe	0,000	10,631	0,000
	Ca	222,562	9,778	0,000
	Mg	0,000	13,019	0,000
Solo 2 + cal (2%) - 0 hrs	Si	0,000	3159,334	379,718
	Al	6,143	203,453	0,000
	Fe	0,003	17,901	0,000
	Ca	379,147	6,499	0,000
	Mg	0,000	22,340	0,000
Solo 2 + cal (3%) - 4 hrs	Si	0,000	5493,402	411,474
	Al	7,232	230,035	0,000
	Fe	0,000	14,895	0,000
	Ca	408,383	4,037	0,000
	Mg	0,000	14,387	0,000
Solo 2 + cimento (1%) - 0 hrs	Si	16,605	1398,555	551,708
	Al	0,842	8,264	0,000
	Fe	0,008	3,122	0,000
	Ca	110,118	0,051	0,000
	Mg	0,000	1,090	0,000
Solo 2 + cimento (2%) - 1 hrs	Si	0,000	2237,654	662,410
	Al	2,886	17,288	0,000
	Fe	0,000	5,650	0,000
	Ca	199,577	0,766	0,000
	Mg	0,000	2,982	0,000
Solo 2 + cimento (3%) - 2 hrs	Si	6,344	2680,732	294,301
	Al	2,018	17,994	0,000
	Fe	0,000	5,459	0,000
	Ca	130,931	0,331	0,000
	Mg	0,000	3,066	0,000

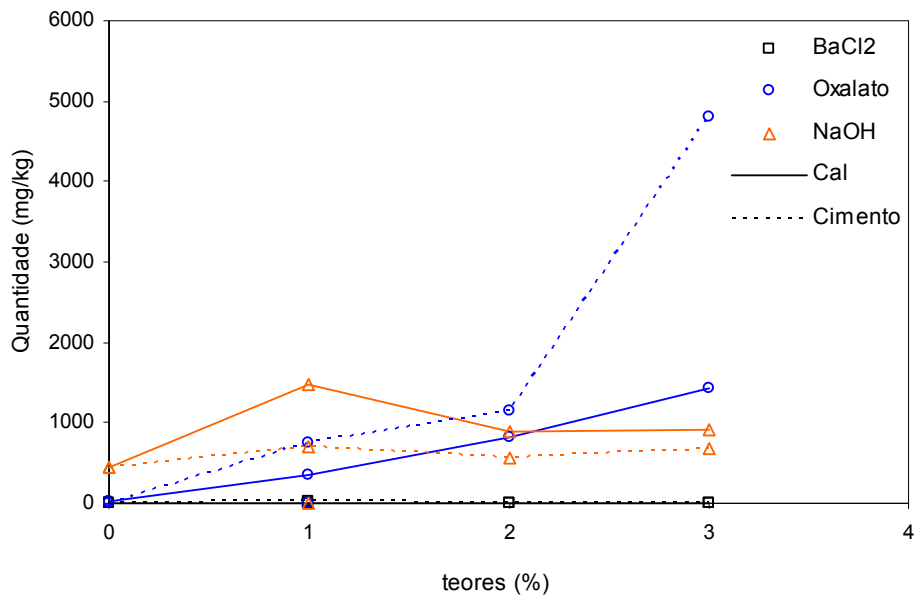


Figura 4.35. Curva de extração de Si amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.

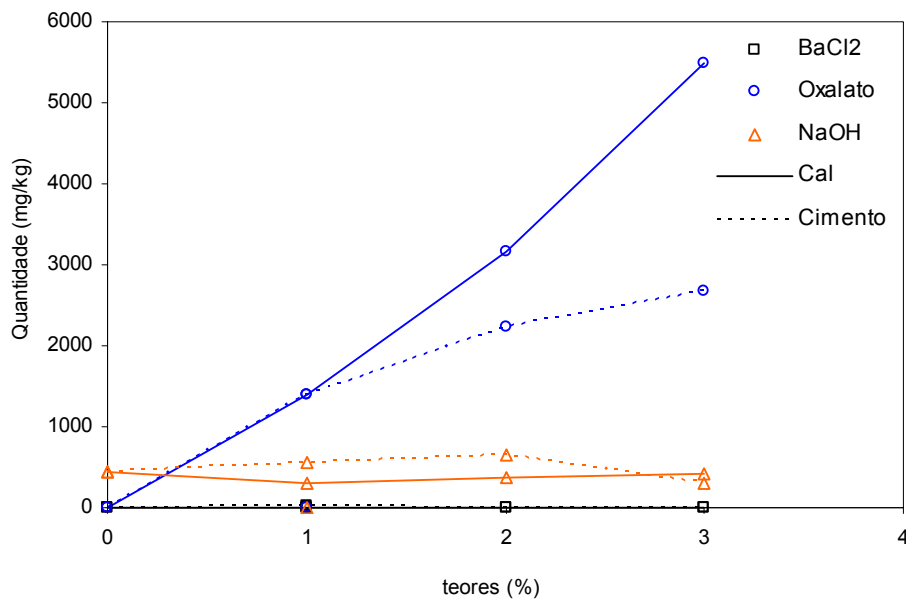


Figura 4.36. Curva de extração de Si amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.

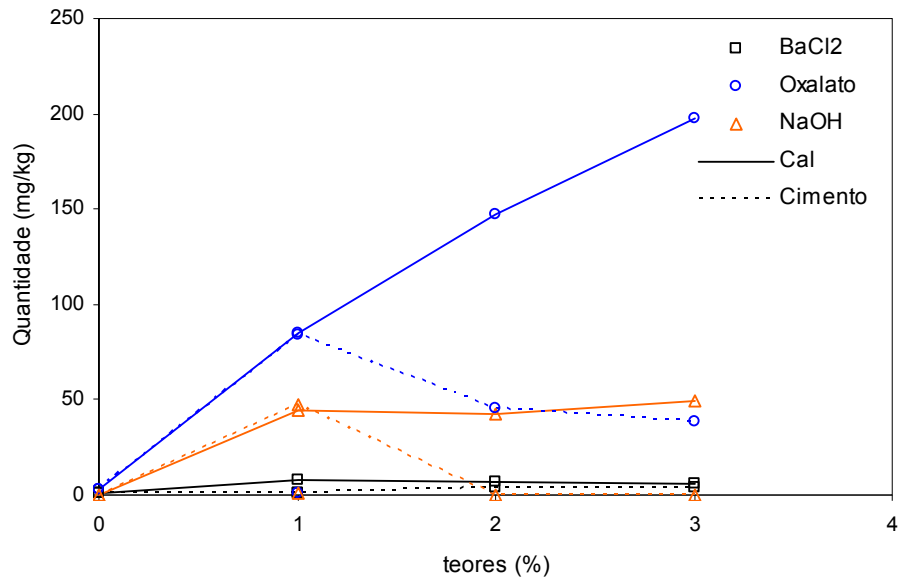


Figura 4.37. Curva de extração de Al amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.

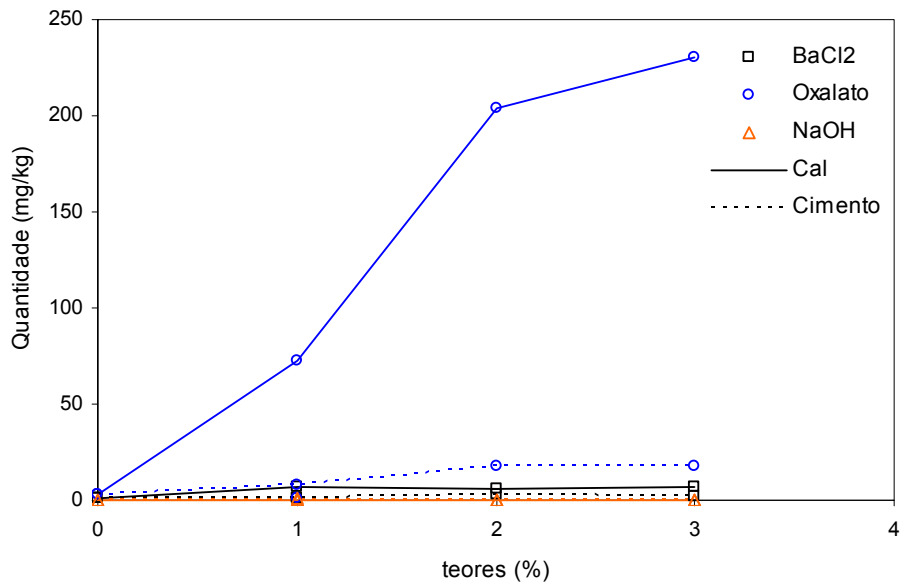


Figura 4.38. Curva de extração de Al amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.

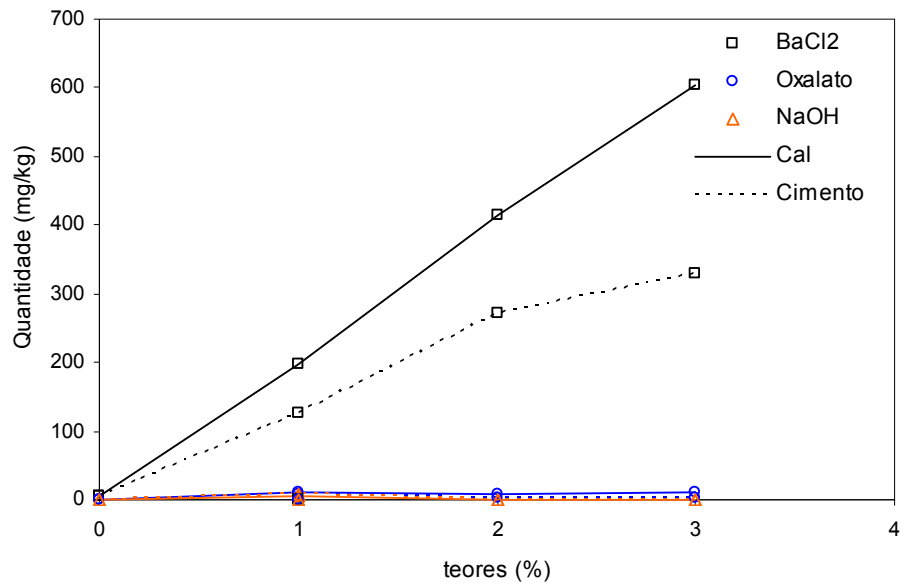


Figura 4.39. Curva de extração de Ca^{2+} trocável para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.

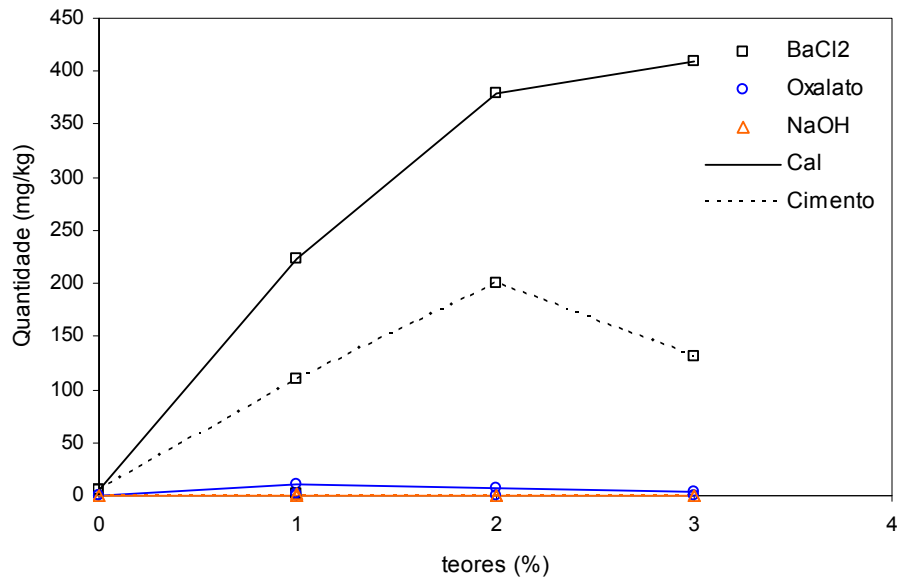


Figura 4.40. Curva de extração de Ca^{2+} trocável para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.

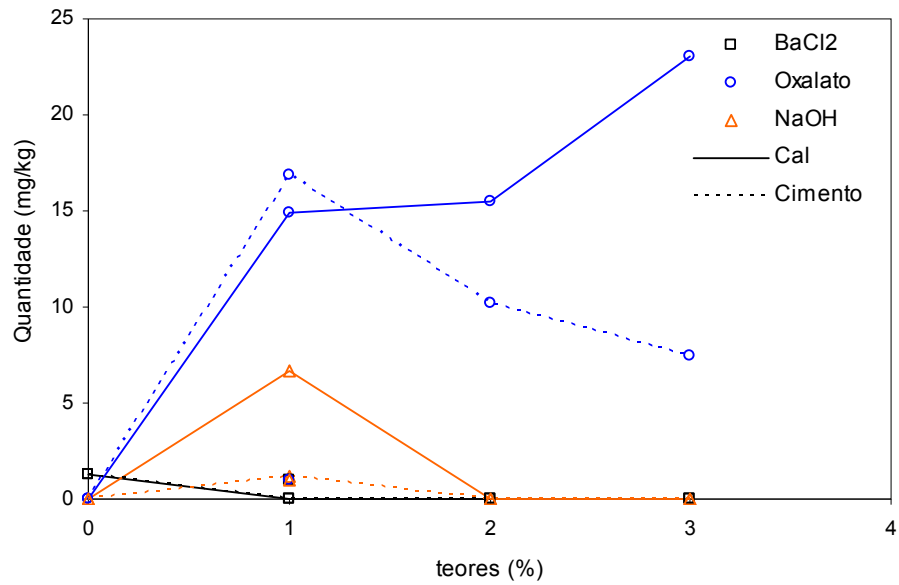


Figura 4.41. Curva de extração de Mg amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.

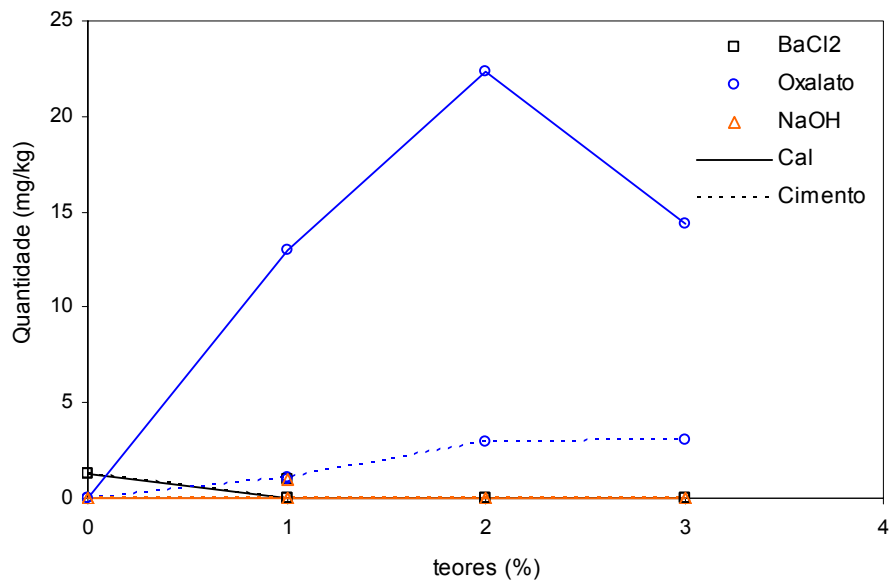


Figura 4.42. Curva de extração de Mg amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.

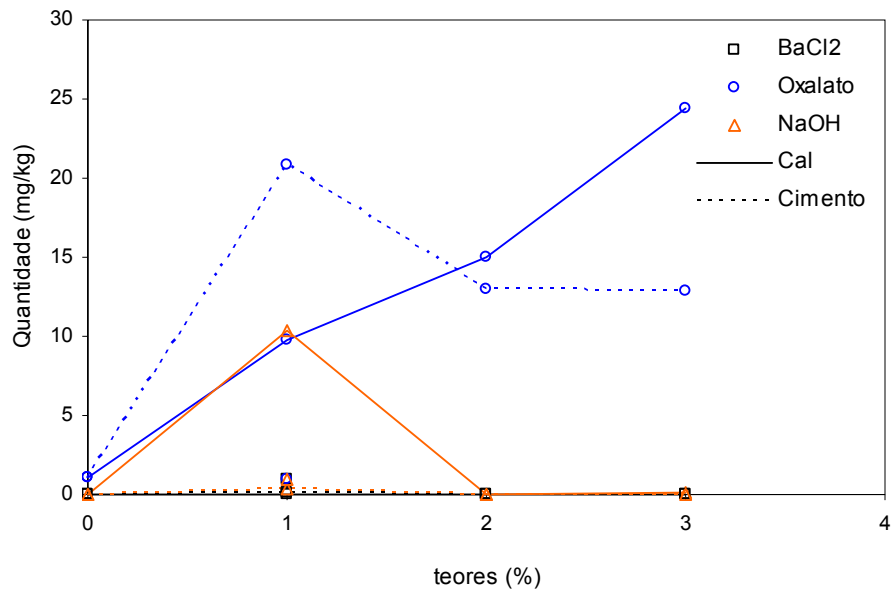


Figura 4.43. Curva de extração de Fe amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 7 dias.

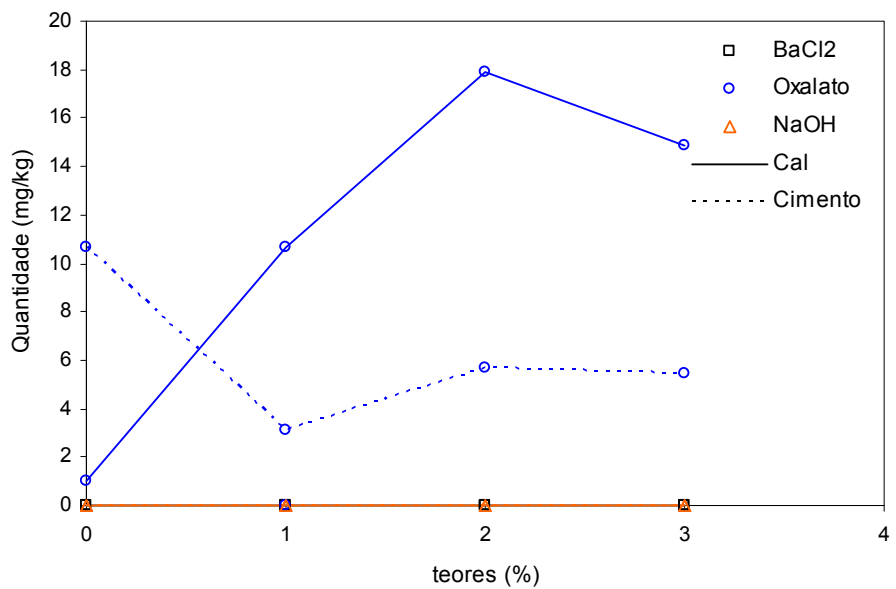


Figura 4.44. Curva de extração de Fe amorfos para misturas do solo 2 com cal e com cimento, para o período de cura de 28 dias.

Dos dados apresentados nas Tabelas 4.42 e 4.43, depreende-se que o solo 2 apresentou as quantidades de 0,237 mg/kg e 446,359 mg/kg de produtos amorfos de Si, para os extratores oxalato e NaOH, respectivamente. Na Figura 4.35, para misturas solo 2-cal, presenciou-se a ocorrência de aumentos significativos de amorfos de Si extraídos pelo oxalato com o aumento no teor de cal. Já, na extração efetuada com NaOH, observou-se a ocorrência de maiores quantidades de Si para o teor de 1% de cal, bem como a tendência de diminuição, para os teores de 2% e 3%. Para o período de cura de 28 dias, Figura 4.36, verificou-se a ocorrência de aumento nas quantidades de amorfos de Si quando extraídas com oxalato, bem como de diminuição nos produtos extraídos com NaOH, em comparação com os resultados obtidos para o período de cura de 28 dias. Similarmente ao caso das misturas solo-2 cal, nas misturas solo 2-cimento, observou-se à ocorrência de aumentos nos produtos de Si extraídos pelo oxalato; bem como que para os produtos amorfos de Si extraídos com NaOH ocorreram diminuições nas quantidades, nos teores de 2 e 3%, sendo que as quantidades maiores de Si foram encontradas para o teor de 1% de cal.

Nas Figuras 4.37 e 4.38, apresentaram-se as curvas com as quantidades de alumínio extraído para cada solução utilizada, no solo 2 e suas misturas com cal e com cimento, para os tempos de cura de 7 e 28 dias, respectivamente. Observaram-se aumentos nas quantidades de minerais de Al na fase amorfa com os teores de cal, somente quando extraídos com o oxalato. No uso do NaOH como extrator, não se identificou variação significativa nas quantidades de amorfos de Al. Quanto à influência do tempo de cura, observou-se que, para 28 dias, ocorreram pequenos aumentos nas quantidades de Al amorfos extraídos por oxalato. Destaca-se que não houve o aparecimento de produtos amorfos de Al determinados pelo NaOH, o que poderia estar relacionado com a cristalização destes produtos amorfos identificados no período de cura de 7 dias. De modo geral, se evidenciou a formação de amorfos de Al para misturas com cimento, na fase inicial de formação. Caso fosse verificada a ocorrência de algum tipo de produto amorfo com o uso do NaOH, poderia-se entender que esse mineral da fase amorfa estivesse em uma fase inicial de cristalização, ou seja, ligado

de maneira mais forte que o evidenciado pelos produtos extraídos com oxalato.

Nas Figuras 4.39 e 4.40, apresentaram-se as curvas com as quantidades de cálcio extraídas para cada solução utilizada no solo 2 e suas misturas com cal e com cimento, para os tempos de cura de 7 e 28 dias, respectivamente. Verificou-se a ocorrência de grandes quantidades extraídas pelo BaCl_2 , o que representou Ca^{2+} na forma trocável, e quantidades insignificantes na forma amorfa, para ambos os estabilizantes estudados.

Já, para os amorfos de Mg observados nas Figuras 4.41 e 4.42, notou-se a ocorrência de aumentos nas quantidades com os teores de cal, para a extração efetuada com oxalato. Para a extração efetuada com NaOH, verificou-se a existência de quantidades significativas somente para o teor de 1% de cal. No caso da extração com oxalato, para o período de cura de 28 dias, não se observou ocorrência de variações expressivas nos valores de amorfos de Mg extraídos, salientando-se, somente, a ocorrência de aumento com o teor de 2% de cal. Já para a extração realizada com NaOH, notou-se que nenhum mineral de Mg em fase amorfa foi identificado, sendo que os produtos identificados no período de 7 dias poderiam ter sofrido cristalização.

Comparativamente, as misturas solo 1-cal apresentaram maiores quantidades de amorfos de Si e Al do que as misturas solo 2-cal, o que pode estar relacionado com o desenvolvimento das reações pozolânicas condicionadas pela fração argila dos solos estudados, maior no caso do solo 1. Para ambos os solos não se identificaram minerais amorfos de Ca, bem como foram detectadas pequenas quantidades de produtos amorfos de Fe e Mg. Já, nas misturas solo-cimento, o solo 2 foi mais efetivo na formação de amorfos a curto prazo, sendo que a longo prazo grande parte dos amorfos já estava em processo de cristalização.

De modo geral, pode-se afirmar que os teores avaliados e os estabilizantes estudados foram efetivos na formação de produtos amorfos.

Verificou-se que o teor de 1% de ambos os estabilizantes, muitas vezes, apresentou picos de concentração de amorfos, o que pode estar relacionado com a velocidade em que a reação se processou, ou seja, pequenas quantidades de cal e de cimento necessitariam menos tempo para efetivar a reação. Outro aspecto de interesse foi que a cal foi mais efetiva do que o cimento na formação de produtos amorfos a curto e médio prazo. Embora o cimento apresentasse menores quantidades de produtos amorfos, no entanto, a cristalização se efetuou mais rapidamente, apresentando diminuições das quantidades de amorfos para as amostras curadas em 28 dias.

4.5.2. Resultados das análises mineralógicas via difratometria de raios-X

A importância da identificação mineralógica está na dependência que as reações químicas entre solo e estabilizante químico possuem nos minerais que compõe o solo. A identificação dos minerais nas diferentes frações do solo é essencial na compreensão dos processos que envolvem a estabilização química dos solos. Em outro aspecto, a possibilidade de identificar novas fases minerais após a estabilização pode vir a ser uma ferramenta para diagnosticar os comportamentos dos solos, complementando os estudos envolvendo as características físicas e químicas do produto final da estabilização.

Nas Figuras 4.45 e 4.46, bem como nas Tabelas 4.44 e 4.45, ilustram-se os dados das análises de difração de raios-X das frações silte-argila e areia, respectivamente, em amostras do solo 1 e 2, e misturas efetuadas com os solos nos teores de 1% (a), 2% (b) e 3% (c) de cal, em amostras curadas no período de 7 dias. Segundo EMBRAPA (1997) as amostras foram preparadas usando a fração areia ($\geq 0,05$ mm) e as frações silte-argila ($<0,05$ mm).

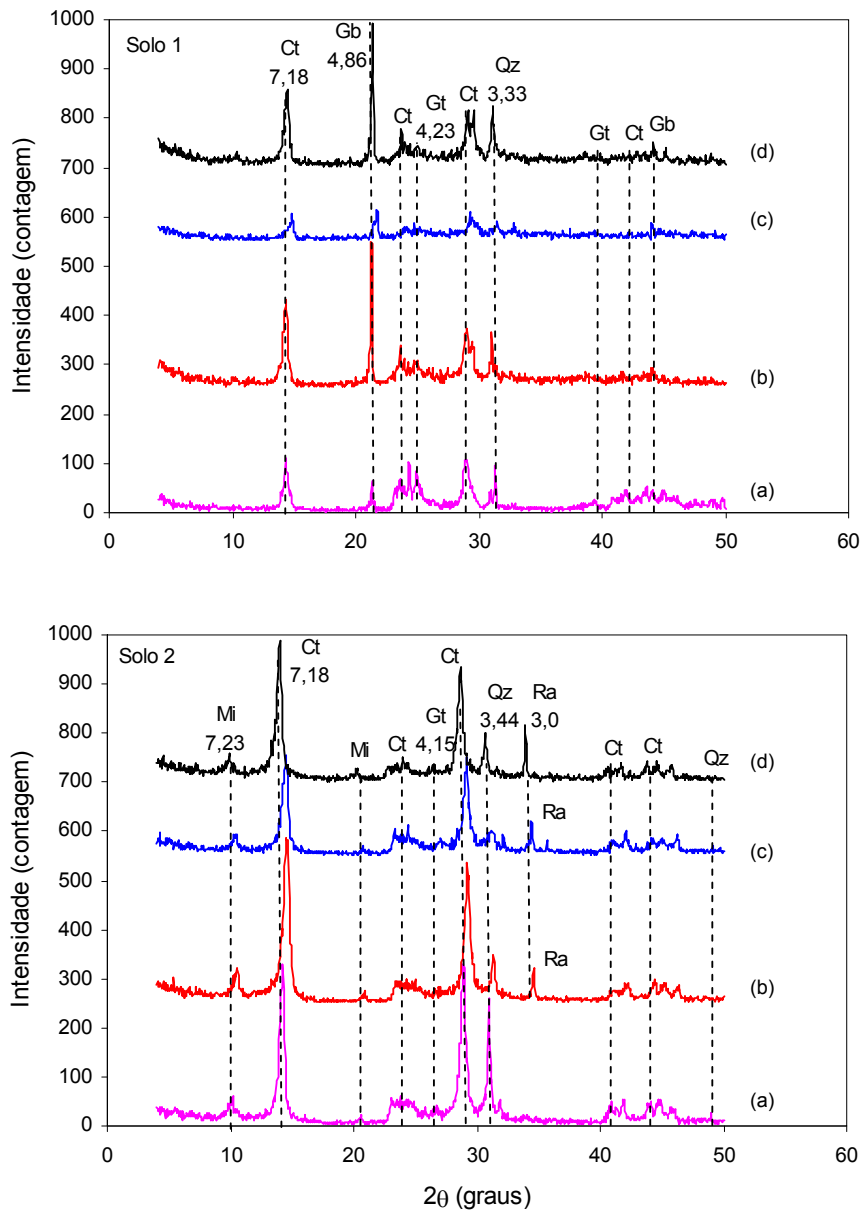


Figura 4.45. Difratoograma da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2 (a), e misturas com cal nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 7 dias.

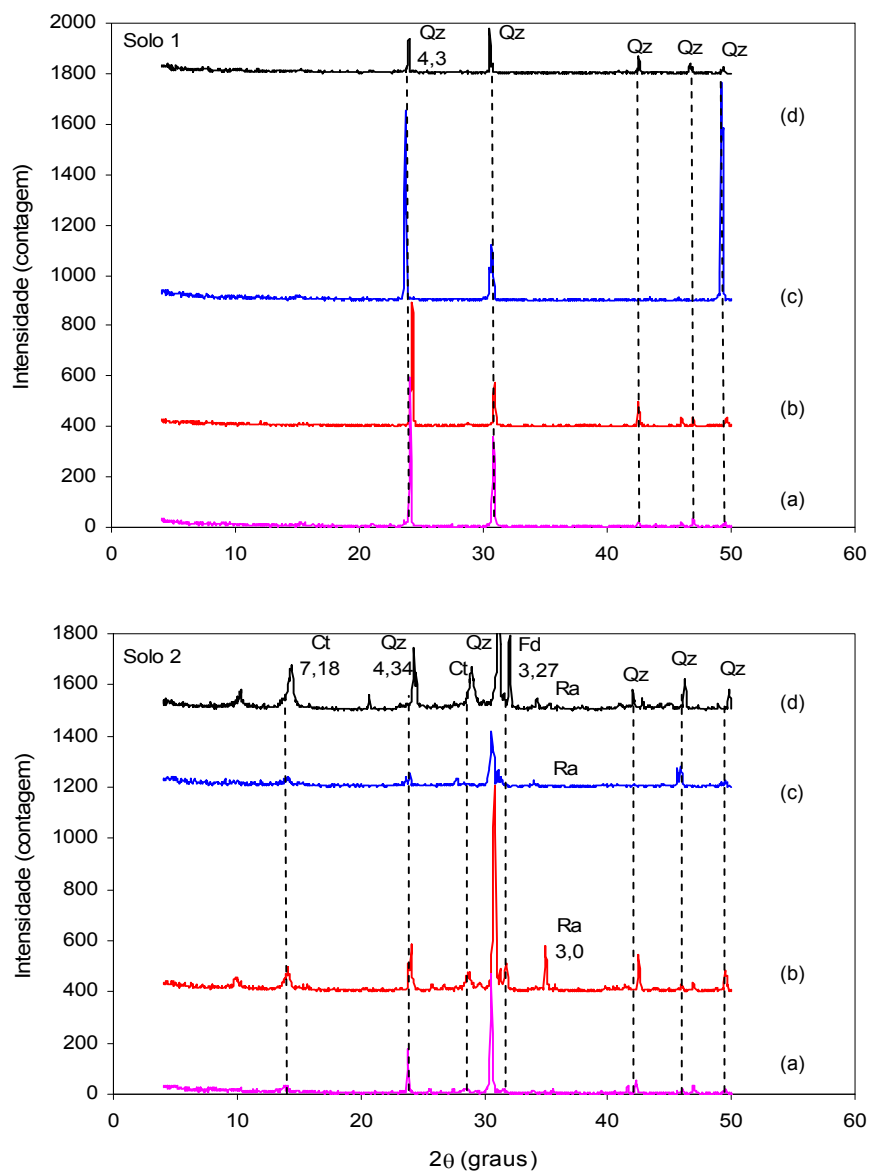


Figura 4.46. Difratograma da fração areia ($\geq 0,05$ mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2 (a), e misturas com cal nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 7 dias.

Tabela 4.44. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cal nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 7 dias

Amostras de solos	Teor (%)	Intensidade dos picos dos minerais identificados						
		Ct (7,18 Å)	Gb (4,86 Å)	Gt (4,23 Å)	Qz (3,33 Å)	Ra (3,0 Å)	Gr (2,63 Å)	Mi (7,23 Å)
Solo 1	0	110	63	73	83	-	-	-
	1	180	185	28	51	-	-	-
	2	47	61	37	43	-	-	-
	3	159	291	35	123	-	-	-
Solo 2	0	329	-	34	259	-	-	60
	1	333	-	33	97	72	-	72
	2	204	-	35	52	71	-	45
	3	290	-	22	25	118	-	38

Tabela 4.45. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração areia (\geq 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cal nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 7 dias

Amostras de solos	Teor (%)	Intensidade dos picos dos minerais identificados						
		Ct (7,18 Å)	Fd (3,27 Å)	Gt (4,23 Å)	Qz (3,33 Å)	Ra (3,0 Å)	Gr (2,63 Å)	Mi (7,23 Å)
Solo 1	0	-	-	-	594	-	-	-
	1	-	-	-	495	-	-	-
	2	-	-	-	757	-	-	-
	3	-	-	-	140	-	-	-
Solo 2	0	34	114	-	177	-	-	-
	1	95	65	-	185	182	-	-
	2	39	292	-	52	-	-	-
	3	176	20	-	247	29	-	-

Nos difratogramas apresentados na Figura 4.45, notou-se que a fração silte-argila do solo 1 mostrou-se essencialmente composta por minerais de caulinita (Ct), gibbsita (Gb), goethita (Gt) e quartzo (Qz), correspondendo à mineralogia de solos bastante intemperizados. Os picos identificados corresponderam à distância entre planos atômicos (d) de 7,18 Å, 4,83 Å, 4,23 Å e 3,33 Å, respectivamente. Já, o solo 2, apresentou em sua constituição minerais micáceos (Mi, 10,12 Å), caulinita (7,2 Å), goethita (4,15 Å) e quartzo (3,44 Å), em concordância com Trindade (2006). Na Figura 4.46 verificou-se que na fração areia do solo 1 predomina, essencialmente, minerais de quartzo (4,3 Å), o que salienta, ainda mais, solos formados em condições de intemperismo intenso. No solo 2 foram identificados minerais de quartzo (4,34 Å), caulinita (7,14 Å) e feldspatos (Fd, 3,27 Å). Segundo

Trindade (2006), a presença de caulinita nessas amostras pode estar associada às pseudoformas herdadas do intemperismo de feldspatos ou muscovitas, que são comumente encontrados nesse solo.

Nas Figuras 4.45 e 4.46, pode-se observar que quando o estabilizante químico foi adicionado, novas fases minerais foram identificadas no solo 2 para o tempo de cura de 7 dias. Na fração silte-argila das misturas do solo 2, identificou-se a presença da rankinita (Ra), silicato de cálcio, em que o pico correspondeu à distância entre planos atômicos de 3,0 Å. Já para o solo 1, os teores de cal avaliados não proporcionaram a formação de novos minerais, sendo que após os tratamentos, as misturas permaneceram com a mesma composição mineralógica do solo não tratado. Observou-se, na Figura 4.46, também, a formação de minerais de rankinita somente para as misturas solo 2-cal.

Nas Figuras 4.47 e 4.48, apresentaram-se os difratogramas das frações silte-argila e areia, respectivamente, em amostras dos solos 1 e 2 e respectivas misturas efetuadas com os teores de cal de 1%(b), 2%(c) e 3%(d), em amostras curadas no período de 28 dias. Do mesmo modo, nas Tabelas 4.46 e 4.47, são expostas as intensidades dos picos dos minerais identificados em tais frações.

Nota-se na Figura 4.47 que, nessas condições de cura, houve a formação do mineral de rankinita na fração silte-argila das misturas solo 2-cal, nos teores de 1%, 2% e 3%, e na mistura solo 1 no teor de 3% de cal. Infere-se que as reações pozolânicas seguidas de cimentação a longo prazo, foram responsáveis pela formação desse mineral. Na Figura 4.48, a fração areia do solo 1 manteve-se com a mesma constituição mineralógica do solo não tratado, sendo que a incorporação do estabilizante nos teores de 1%, 2% e 3% de cal não foi suficiente para condicionar a formação de um novo mineral. Essa dificuldade relacionou-se com a presença do mineral quartzo, que não participou das reações pozolânicas, devido às suas particularidades de estruturação. Por outro lado, o solo 2 apresentou novamente a formação da Rankinita para os três teores de cal estudados. Pode-se associar tal fato aos minerais pseudomorfos de caulinita e às micas

(em processo de intemperismo), que podem ter auxiliado nas reações pozolônicas.

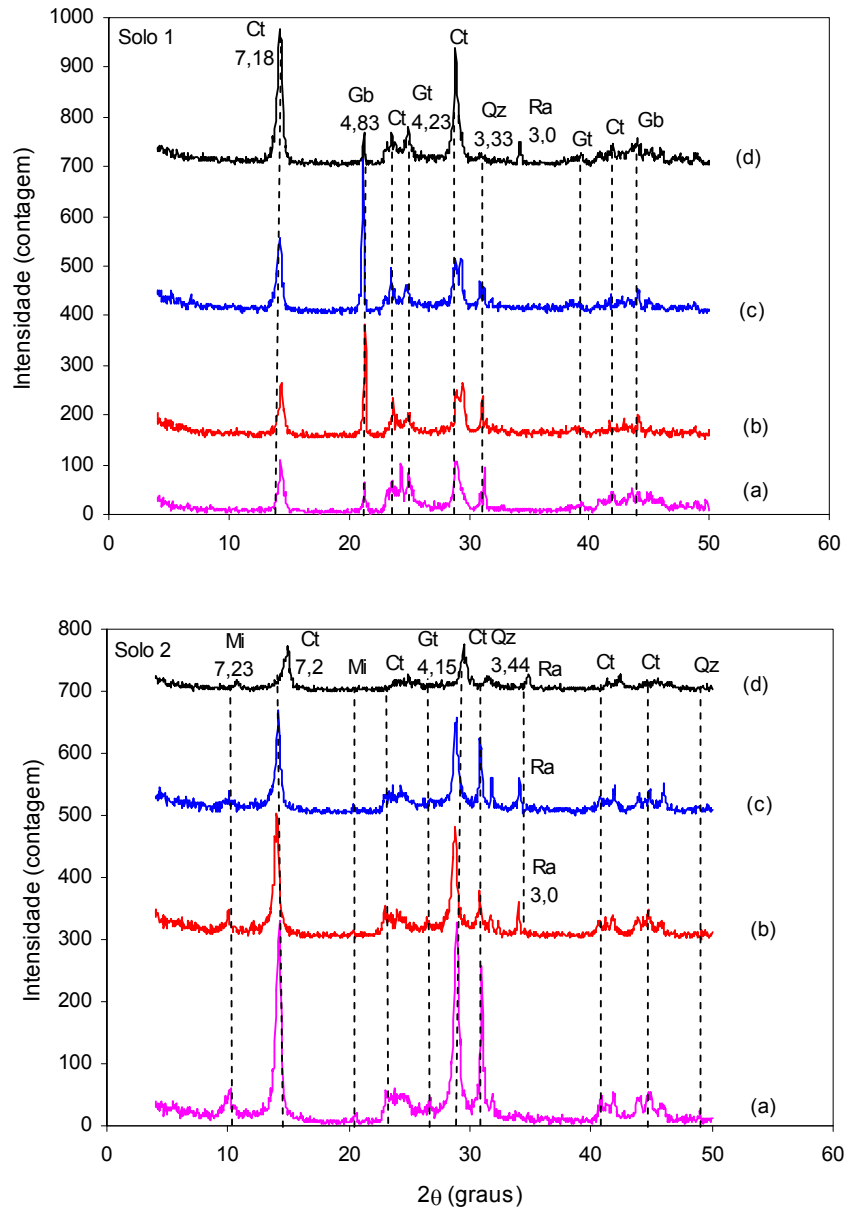


Figura 4.47. Difratograma da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2 (a), e misturas com cal nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 28 dias.

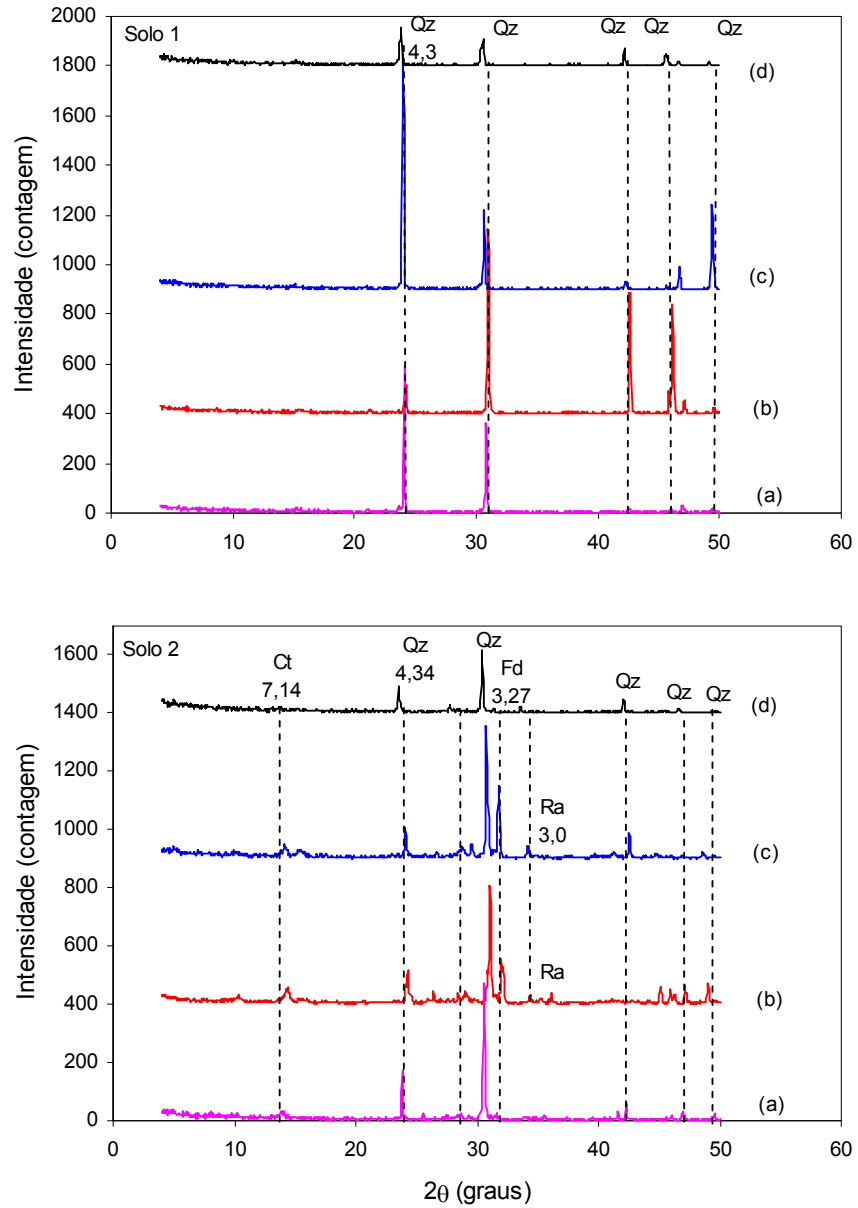


Figura 4.48. Difratograma da fração areia ($\geq 0,05$ mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2 (a), e misturas com cal nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 28 dias.

Tabela 4.46. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cal nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 28 dias

Amostras de solos	Teor (%)	Intensidade dos picos dos minerais identificados						
		Ct (7,18 Å)	Gb (4,86 Å)	Gt (4,23 Å)	Qz (3,33 Å)	Ra (3,0 Å)	Gr (2,63 Å)	Mi (7,23 Å)
Solo 1	0	110	63	73	83	-	-	-
	1	117	234	54	90	-	-	-
	2	155	341	63	61	-	-	-
	3	279	68	79	26	49	-	-
Solo 2	0	329	-	34	259	-	-	60
	1	204	-	36	76	76	-	47
	2	171	-	28	124	124	-	38
	3	73	-	11	23	23	-	15

Tabela 4.47. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração areia ($\geq 0,05$ mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cal nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 28 dias

Amostras de solos	Teor (%)	Intensidade dos picos dos minerais identificados						
		Ct (7,18 Å)	Fd (3,27 Å)	Gt (4,23 Å)	Qz (3,33 Å)	Ra (3,0 Å)	Gr (2,63 Å)	Mi (7,23 Å)
Solo 1	0	-	-	-	594	-	-	-
	1	-	-	-	116	-	-	-
	2	-	-	-	854	-	-	-
	3	-	-	-	156	-	-	-
Solo 2	0	34	114	-	177	-	-	-
	1	57	159	-	114	35	-	-
	2	47	248	-	106	45	-	-
	3	16	15	-	91	24	-	-

Nas Figuras 4.49 e 4.50, ilustram-se os dados das análises de difração de raios-X das frações silte-argila e areia, respectivamente, em amostras do solo 1 e 2 e respectivas misturas efetuadas nos teores de 1%, 2% e 3% de cimento, em amostras curadas no período de 7 dias. Já as Tabelas 4.48 e 4.49, apresentam-se os picos de intensidade dos minerais identificados.

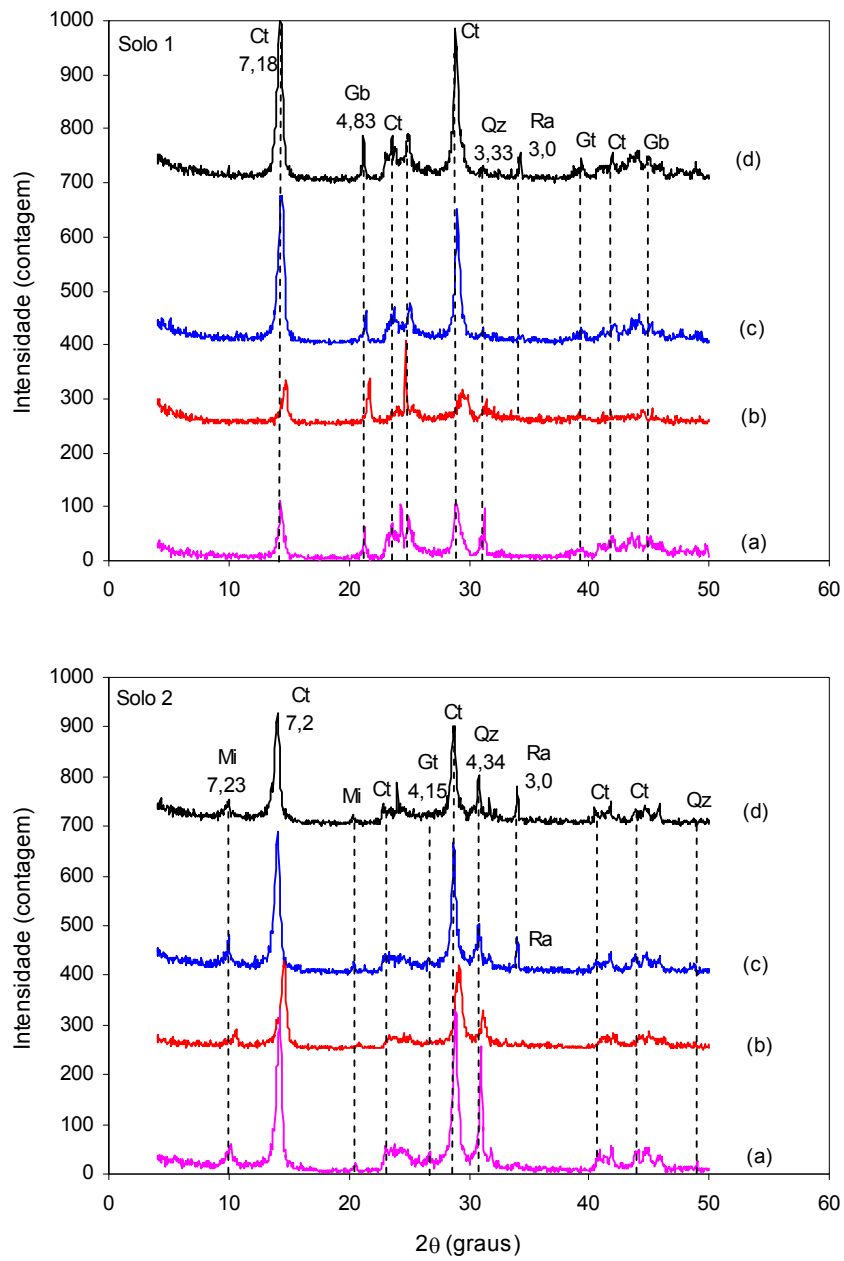


Figura 4.49. Difratoograma da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2 (a), e misturas com cimento nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 7 dias.

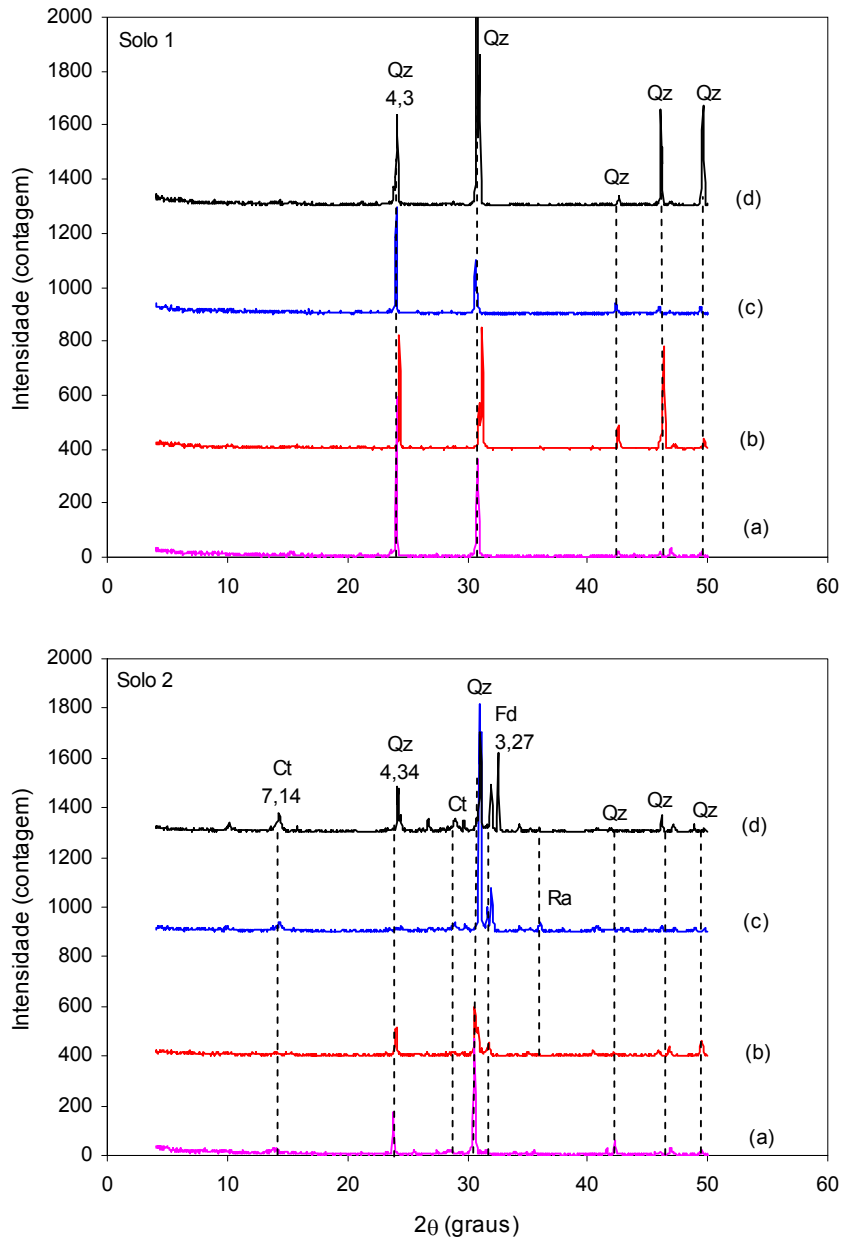


Figura 4.50. Difratoograma da fração areia ($\geq 0,05$ mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2 (a), e misturas com cimento nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 7 dias.

Tabela 4.48. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cimento nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 7 dias

Amostras de solos	Teor (%)	Intensidade dos picos dos minerais identificados						
		Ct (7,18 Å)	Gb (4,86 Å)	Gt (4,23 Å)	Qz (3,33 Å)	Ra (3,0 Å)	Gr (2,63 Å)	Mi (7,23 Å)
Solo 1	0	110	63	73	83	-	-	-
	1	77	87	159	48	-	-	-
	2	276	64	76	23	-	-	-
	3	324	86	92	31	57	-	-
Solo 2	0	329	-	34	259	-	-	60
	1	185	-	19	79	-	-	48
	2	291	-	36	79	79	-	23
	3	227	-	30	37	81	-	31

Tabela 4.49. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração areia (≥ 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cimento nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 7 dias

Amostras de solos	Teor (%)	Intensidade dos picos dos minerais identificados						
		Ct (7,18 Å)	Fd (3,27 Å)	Gt (4,23 Å)	Qz (3,33 Å)	Ra (3,0 Å)	Gr (2,63 Å)	Mi (7,23 Å)
Solo 1	0	-	-	-	594	-	-	-
	1	-	-	-	419	-	-	-
	2	-	-	-	395	-	-	-
	3	-	-	-	341	-	-	-
Solo 2	0	34	114	-	177	-	-	-
	1	19	52	-	601	-	-	-
	2	40	175	-	915	37	-	-
	3	82	192	-	1440	-	-	-

Na Figura 4.49, observou-se na fração silte-argila do solo 1, a formação da Rankinita no teor de 3% de cimento em um tempo de cura relativamente curto. Como as reações proporcionadas pela adição do cimento se processam rapidamente, pode-se dizer que as reações de hidratação seguida da cimentação podem ter condicionado essa forma cristalina. Para as misturas efetuadas com o solo 2, verificou-se a formação da Rankinita, nos teores de 2% e 3% de cimento. Nas análises da fração areia apresentadas na Figura 4.50, notou-se um pequeno pico de Rankinita para misturas do solo 2 com o teor de 2% de cimento, sendo que nenhuma alteração mineralógica foi evidenciada na fração areia das misturas realizadas com o solo 1.

Nas Figuras 4.51 e 4.52, e nas Tabelas 4.50 e 4.51, apresentam-se resultados de análises da difração de raios-X das frações silte-argila e areia, respectivamente, das amostras dos solos 1 e 2 e respectivas misturas com os teores de cimento de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), curadas durante 28 dias.

Na Figura 4.51, na fração silte-argila das misturas de ambos os solos, observou-se a formação de minerais de Rankinita nos três teores analisados. Com a cura realizada em 28 dias, as reações tiveram maior tempo para se processarem, possibilitando a formação dessa nova fase mineral. Pode-se dizer que além das reações de hidratação, as reações pozolânicas foram essenciais para a formação desses minerais. Na fração areia das misturas realizadas com o solo 1 (Figura 4.52), notou-se a formação de uma nova fase de minerais identificada como grossular (Gr), que consiste num silicato aluminato de cálcio ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)$), com pico correspondente à distância entre planos atômicos de 2,63 Å, onde se verificou a presença de pequenos picos nos teores de 1% e 2% de cimento. Notou-se, também, a ocorrência de um pequeno pico de rankinita, na mistura solo 2 com 1% de cal.

De modo geral, pode-se afirmar que apesar das formações de novos minerais pela adição de cal estar associada aos argilominerais que compõem as frações do solo (BARELLI, 1992), os teores utilizados na estabilização do solo 1, não foram suficientes para efetivar as reações pozolânicas para o tempo de cura de 7 dias. Porém, as misturas realizadas com o solo 2 mostraram-se mais efetivas na formação de novas formas minerais. O mesmo ocorreu nas misturas efetuadas com o cimento, porém o aparecimento da Rankinita ocorreu de forma mais rápida, o que pode estar associado ao fato das reações de hidratação e cimentação ocorrerem em espaços de tempo relativamente curtos. Refere-se que a Rankinita é um silicato de cálcio típico das reações de hidratação do silicato tricálcico (C_3S ou 3CaOSiO_2), comuns nas reações com cimento Portland (PETRUCCI, 1998), e reações pozolânicas entre a sílica (SiO_2) e óxido de cálcio (CaO) nas misturas solo-cal (GUIMARÃES, 1971; TRB, 1976).

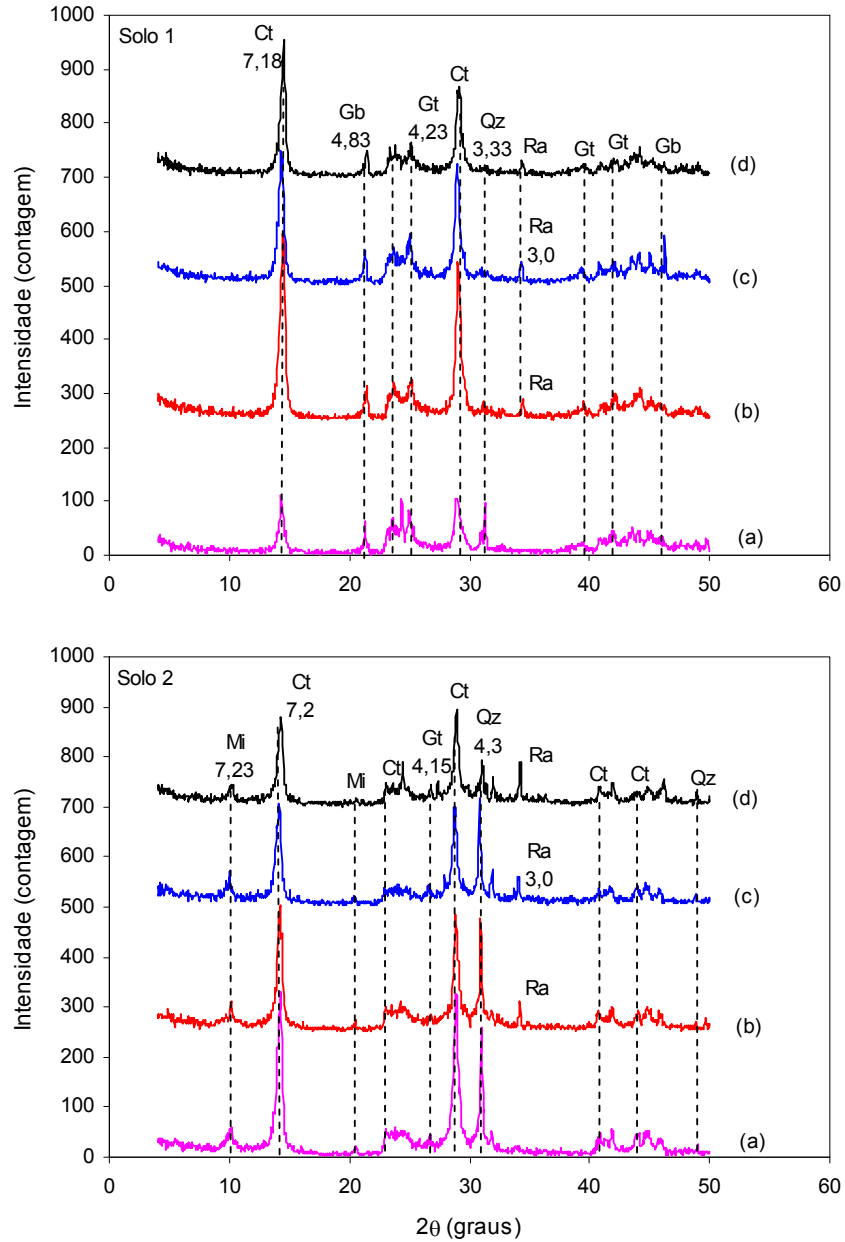


Figura 4.51. Difratograma da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2 (a), e misturas com cimento nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 28 dias.

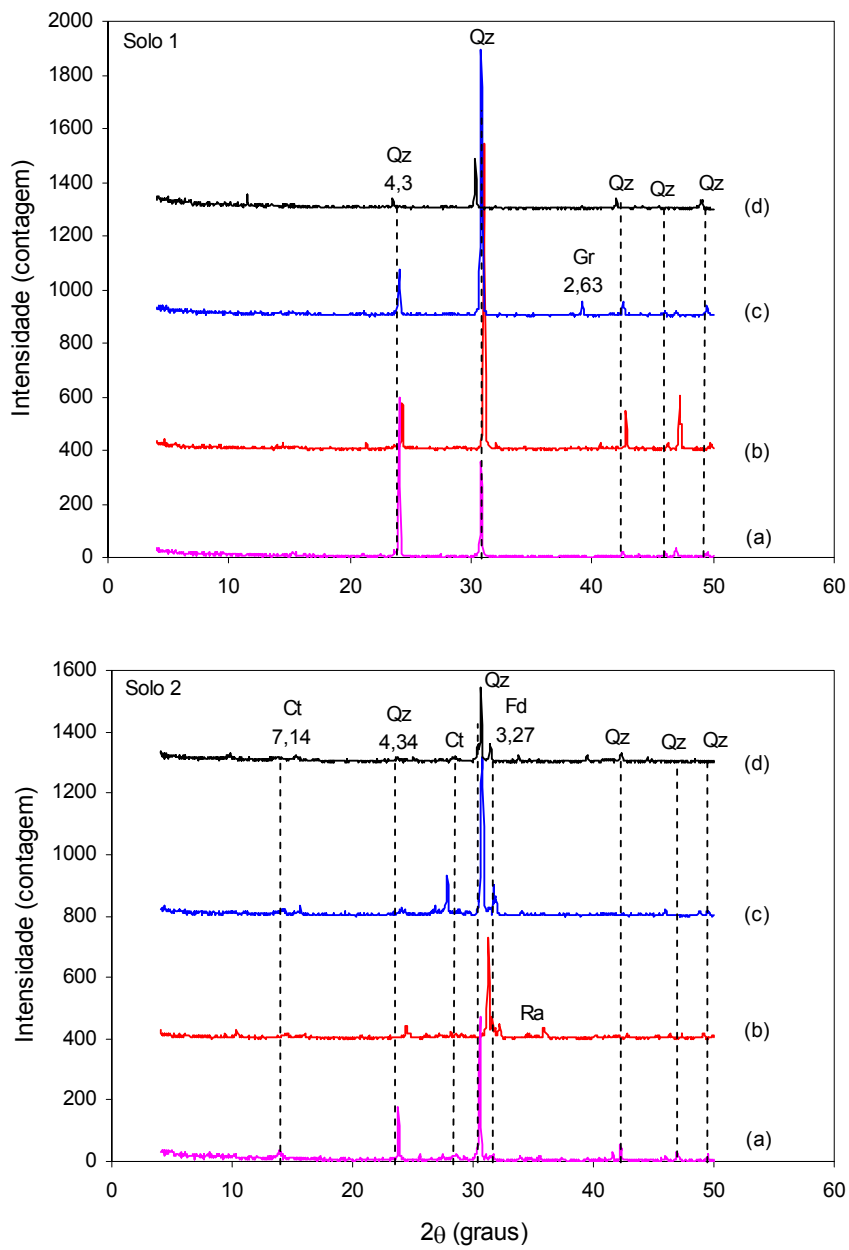


Figura 4.52. Difratoograma da fração areia ($\geq 0,05$ mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2 (a), e misturas com cimento nos teores de 1% (b), 2% (c) e 3% (d), no período de cura de 28 dias.

Tabela 4.50. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração silte-argila (< 0,05 mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cimento nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 28 dias

Amostras de solos	Teor (%)	Intensidade dos picos dos minerais identificados						
		Ct (7,18 Å)	Gb (4,86 Å)	Gt (4,23 Å)	Qz (3,33 Å)	Ra (3,0 Å)	Gr (2,63 Å)	Mi (7,23 Å)
Solo 1	0	110	63	73	83	-	-	-
	1	347	64	69	34	38	-	-
	2	234	65	96	33	45	-	-
	3	256	50	62	32	32	-	-
Solo 2	0	329	-	34	259	-	-	60
	1	252	-	31	228	62	-	61
	2	208	-	29	219	62	-	71
	3	181	-	51	95	91	-	43

Tabela 4.51. Intensidade dos picos dos minerais identificados da fração areia ($\geq 0,05$ mm) das amostras não tratadas dos solos 1 e 2, e misturas com cimento nos teores de 1%, 2% e 3%, no período de cura de 28 dias

Amostras de solos	Teor (%)	Intensidade dos picos dos minerais identificados						
		Ct (7,18 Å)	Fd (3,27 Å)	Gt (4,23 Å)	Qz (3,33 Å)	Ra (3,0 Å)	Gr (2,63 Å)	Mi (7,23 Å)
Solo 1	0	-	-	-	594	-	-	-
	1	-	-	-	178	-	-	-
	2	-	-	-	173	-	54	-
	3	-	-	-	14	-	-	-
Solo 2	0	34	114	-	177	-	-	-
	1	19	69	-	328	35	-	-
	2	22	102	-	518	12	-	-
	3	12	60	-	246	-	-	-

Nas Tabelas 4.44 a 4.51, observou-se, de modo geral, decréscimos nas intensidades dos picos dos minerais de argila originalmente presentes no solo 1 e 2 (Ct, Gb, Gt), e alguns minerais primários presentes no solo 2 (Mi e Fd), com o aumento dos teores dos estabilizantes químicos. Reforça-se que o processo de estabilização foi responsável por parte do consumo dos minerais do solo através das reações químicas com a cal e o cimento. Tal processo ocorreu mais claramente com os minerais argílicos, onde a reatividade da fração argila com os estabilizantes, condiciona a formação da Rankinita. Observa-se, também, que da mesma maneira que as intensidades dos picos das fases minerais presentes nos solos decaem, as intensidades dos picos da Rankinita aumentam com os teores de cal e

cimento. Portanto, parte dos minerais consumidos nas reações está resultando na formação de novos produtos minerais.

4.6. DISCUSSÕES GERAIS

Os parâmetros geotécnicos dos solos estabilizados quimicamente, presentemente estudados, que dependem essencialmente das reações solo-estabilizante que ocorrem a curto prazo são: granulometria, índice de plasticidade e peso específico aparente seco máximo. Analisando esses parâmetros isoladamente, bem como influenciados pelos tempos decorridos entre mistura e realização dos ensaios, para as misturas solo 1-cal, verificou-se que eles variaram em comportamentos não definidos geometricamente, e ainda, diferenciados para cada teor avaliado. Porém, comparando-se, primeiramente, os valores obtidos dos parâmetros de porcentagem da fração argila e IP, nos tempos de descanso analisados, observou-se, de modo geral, que as trajetórias das curvas obtidas nos valores de IP foram de tendências contrárias, ou seja, as reações de troca catiônica provocaram pequenas modificações nos valores de IP que foram diretamente associadas à floculação da fração argila. Assim, aumentos nos valores de IP podem estar associados às reduções na fração argila do solo 1, o que salienta ainda mais a efetividade das reações de troca catiônica nas modificações das propriedades deste solo. Nos comportamentos dos parâmetros de compactação γ_d e IP, com o tempo entre mistura e realização dos ensaios, observou-se semelhanças nas trajetórias, o que também pode estar associado aos fenômenos de troca catiônica ocorridos.

Ao contrário do que se observou com as misturas solo 1-cal, nas misturas efetuadas com o cimento, o tempo decorrido entre a mistura e a realização dos ensaios resultou em comportamentos de IP e γ_{dmax} com trajetórias oscilantes, porém geometricamente semelhantes entre os teores de cimento de 1%, 2% e 3%. Salienta-se que as maiores alterações nos valores de IP e γ_d foram relacionadas com as maiores aglomerações na fração argila, que coincidiu com os maiores tempos entre mistura e realização do ensaio (8 horas), evidenciando a efetividade das reações de

hidratação do cimento associadas às reações de troca catiônica. Apesar disso, as reações de troca catiônica nas misturas solo 1-cal foram responsáveis por maior queda na plasticidade.

As propriedades geotécnicas das misturas realizadas com o solo 2 sofreram menores alterações, quando comparadas com o solo 1. As incorporações da cal e do cimento, individualmente, ao solo 2 não produziram alterações significativas na composição granulométrica, IP e γ_{dmax} com o tempo entre mistura e realização dos ensaios, e não apresentaram nenhum tipo de semelhança na trajetória das curvas que descrevem tais comportamentos. Quando se refere às misturas solo 2-cimento, as variações tornaram-se mais expressivas. O cimento demonstrou ser mais eficiente na modificação de plasticidade, onde, possivelmente, as reações de hidratação que ocorreram influenciaram nos comportamentos de plasticidade do solo 2. O tempo entre mistura e ensaio não influenciou, de forma significativa, os valores de IP das misturas. Observou-se, também, que a incorporação do cimento foi mais efetiva nas alterações das frações granulométricas do solo 2, destacando-se, novamente, o tempo entre mistura e realização do ensaio de 8 horas. Também, não foram observadas alterações significativas nos valores de γ_{dmax} das misturas, mas observou-se semelhança de comportamento nos teores de 2% e 3% com o tempo de descanso entre mistura e compactação.

Destaca-se que as hipóteses apresentadas têm embasamento nas características químicas das misturas estudadas. Observou-se a ocorrência de aumentos nos valores de pH com os teores dos estabilizantes, nos dois solos utilizados. Entende-se que tal fato se relacionou com o aumento da CTC e da saturação da superfície da partícula pelos íons cálcio, que foram responsáveis pelo fenômeno de floculação. As reações de troca catiônica foram ativadas pela presença de tal íon, sendo assim, responsáveis pelo comportamento dos parâmetros discutidos anteriormente. Adicionalmente, cabe destacar a ocorrência das reações de hidratação do cimento Portland, que foram responsáveis por alterações nas propriedades das misturas solo-cimento, no período mais longo entre mistura e realização de ensaios.

Notou-se a ocorrência de freqüentes oscilações na constituição granulométrica, índice de plasticidade e peso específico aparente seco máximo, o que, ao longo do trabalho, foi justificado por reações de troca catiônica. Osula (1996) supõe que as mudanças nas propriedades dos solos ocorrem até que o processo de aglomeração cesse. No entanto, é esperado que essas alterações reduzam com o tempo, de forma exponencial. Acredita-se que, apesar das reações de troca acontecerem instantaneamente, ocasionando quedas nos IPs com os teores de estabilizantes, nos tempos entre mistura e realização dos ensaios elas ainda estão em processo, não conferindo aos solos um comportamento definido. Entende-se que, também, o ponto de fixação de cal (LPF), relatado por Hilt e Davidson (1960), não foi alcançado, considerando-se as características mineralógicas dos solos estudados.

Outro aspecto enfatizado nesse trabalho foi a avaliação da formação do produto final, sob influência dos tempos decorridos entre mistura e compactação, na resistência dos solos estabilizados com baixos teores de cal e cimento. De modo geral, todos os teores de cal e cimento aplicados ao solo 1 levaram à presença de minerais na fase amorfa. Notou-se que os produtos amorfos encontrados em quantidades significativas eram constituídos de silício e alumínio. Segundo Herrin e Mitchell (1961), o gel de silicato e aluminato de cálcio tende a cimentar as partículas de solo resultando em ganhos na resistência mecânica. Nas misturas solo 1-cal verificou-se ganhos de resistência e associou-se isto aos produtos amorfos encontrados. Amostras dessas misturas, curadas em 7 e 28 dias, apresentaram praticamente mesma quantidade de amorfos, e pode-se, também, verificar que os valores de resistência à compressão não-confinada não apresentaram, estatisticamente, variações significativas. Por outro lado, ganhos significativos de resistência estiveram diretamente associados às formas cristalinas encontradas, ou seja, as quantidades de produtos amorfos apresentaram diminuições entre os tempos de cura de 7 e 28 dias, o que já indica uma tendência às formações cristalinas, e ainda foi identificada a formação do mineral Rankinita nos difratogramas de raios-X. Nas misturas

solo 1-cimento, essa formação cristalina, muitas vezes, foi observada em amostras curadas durante 7 dias.

Nas misturas solo 2-cal, notou-se a formação de novos minerais já no tempo de cura de 7 dias, e, associadamente, ganhos de resistência bastantes expressivos. Porém, no tempo de cura de 28 dias, verificou-se a ocorrência de aumentos nos produtos amorfos e nenhuma alteração no difratograma de raios-X e na resistência à compressão não-confinada, quando comparado ao tempo de cura de 7 dias.

De fato, as modificações ocasionadas nos parâmetros de compactação, índice de plasticidade e na composição granulométrica dos solos, podem não ser expressivos para fins práticos. Porém, os aumentos de resistência proporcionados pelos baixos teores de estabilizantes utilizados foram bastante significativos, sendo de valores suficientes para algumas aplicações na engenharia rodoviária, com destaque para aplicações dos materiais estabilizados como camadas de melhoria do subleito, reforço e sub-base de pavimentos flexíveis.

Com relação aos mecanismos de reações para solos modificados com cal e cimento, concordou-se com os relatos da literatura especializada, em que os íons hidroxila liberados da cal elevam o pH da mistura a um valor suficientemente alto, de modo que a sílica e a alumina sejam dissolvidas da argila, formando géis de silicatos ou aluminatos hidratados de cálcio que tendem a cimentar lentamente (HERRIN e MITCHELL, 1961; TRB, 1976; LIMA, 1981).

5. CONCLUSÕES

- Os baixos teores de cal e cimento utilizados nas misturas provocaram variações significativas, estatisticamente, na composição granulométrica do solo 1, destacando-se que o cimento foi mais efetivo, inclusive nos maiores tempos entre mistura e ensaio. Para o solo 2 as variações não foram significativas, salientando-se, somente a atuação do cimento nos períodos mais longos entre mistura e ensaio.
- Apesar de não ocorrerem variações significativas, estatisticamente, com o tempo entre mistura e realização dos ensaios, a incorporação da cal foi mais efetiva na queda instantânea da plasticidade dos solos. Por outro lado, nas misturas solo-cimento, ocorreram reações de troca catiônica, bem como de hidratação que ocasionaram alterações maiores de plasticidade, em tempos maiores entre mistura e ensaio.
- Os parâmetros de compactação das misturas não apresentaram variações significativas, estatisticamente, e mostraram comportamentos oscilantes com os tempos entre mistura e compactação. Nas misturas efetuadas com a cal, o parâmetro γ_{dmax} apresentou trajetórias de curvas diferentes para cada teor de cal. Já, para o cimento, o comportamento geométrico foi semelhante para os teores estudados, também apresentando oscilações com os tempos entre mistura e compactação. Apesar de oscilante, os comportamentos de w_{ot} com os tempos entre mistura e compactação, apresentaram, de modo geral, trajetórias de curvas semelhantes entre os teores, com exceção das misturas solo 1-cimento.
- As análises químicas mostraram aumentos de pH, CTC e SB e íons cálcio proporcionais aos teores de cal e cimento avaliados. Aumentos na CTC foram responsáveis pelas modificações dos parâmetros IP, constituição granulométrica, γ_{dmax} e nos valores de pH dos solos. Os aumentos de pH foram responsáveis pela dissolução dos minerais de

sílica e alumina da fração argila do solo, o que levou à formação de produtos amorfos e cristalinos, resultantes das reações pozolânicas e/ou de cimentação.

- Todas as misturas avaliadas resultaram em aumentos na resistência a compressão não-confinada, sendo que esses aumentos foram proporcionais aos teores avaliados. Nas misturas solo-cal os aumentos foram relacionados com os produtos amorfos resultantes das reações pozolânicas. As maiores taxas de aumentos de resistência foram associadas com as misturas em que foram identificados, nos difratogramas de raios-X, o mineral rankinita (silicato de cálcio). As variações não significativas foram observadas nos valores de resistência entre os tempos de cura de 7 e 28 dias, em que, de modo geral, não houve ocorrência de formação de novos minerais, mantendo-se ainda na fase amorfa para os dois tempos de cura. Ocorreram oscilações nos valores de resistência com o tempo decorrido entre mistura e compactação das amostras, não definindo um tempo ótimo de resistência com os teores de cal avaliados. Nas misturas solo-cimento verificou-se, em algumas situações, a formação do mineral rankinita, já com o tempo de cura de 7 dias, o que coincide com maiores aumentos de resistência quando comparados com as misturas solo-cal. Em algumas situações, notou-se a ocorrência de aumentos de resistência das misturas solo-cimento com amostras curadas durante 28 dias. Por outro lado, em algumas situações essas misturas não proporcionaram variações significativas nos valores de RCNC entre os tempos de cura estudados, onde se identificou a permanência do mineral rankinita ou produtos amorfos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ampliação do período de cura das amostras, extendendo-o a 56, 112, 224, 336 e 448 dias, por exemplo.
- Ampliação dos teores de estabilizantes analisados, com a incorporação dos quantitativos de 4, 8 e 12% em relação à massa de solo seco.
- Modelagem estatística do comportamento mecânico das misturas, considerando-se diferentes teores de estabilizantes, períodos de cura e minerais formados após a quantificação dos mesmos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÂNTARA, M. A. M. **Estabilização química dos solos para fins rodoviários: técnicas disponíveis e estudo de caso dirigido à estabilização solo-cal de três solos de Ilha Solteira-SP.** Viçosa: UFV, 1995. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Estudo Técnico 35: Dosagem das misturas de solo-cimento: Normas de dosagem.** 3. ed., São Paulo, SP, 51 p, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: solo: amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, RJ, 7 p, 1986_a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181/84, Solo – Análise Granulométrica – Procedimento,** Rio de Janeiro, 13p, 1984_a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo: ensaio de compactação: Procedimento.** Rio de Janeiro, RJ, 10 p, 1986_b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459/84, Solo - Determinação do limite de liquidez,** Rio de Janeiro, 6p, 1984_b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180/84, Solo – Determinação do limite de plasticidade,** Rio de Janeiro, 3p, 1984_c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508/84, Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica,** Rio de Janeiro, 8p, 1984_d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253/90, Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento,** Rio de Janeiro, 4p, 1990.

- ARMAN, A.; MUNFAK, G. **Stabilization of organic soils with lime**. Baton Rouge – LA, USA, Division of Engineering Research, Louisiana State University, Bulletin No. 103, 131 p., 1970.
- ATTOH-OKINE, N. O. Lime treatment of laterite soils and gravels – revisited. **Construction and Building Materials**, v.9, n.5, p.283-287,1995.
- AZEVEDO, M. A. A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa-MG**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa: Imprensa Universitária, 169 p, 1999. (Dissertação de Mestrado).
- BANZATTO, O. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 4.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006.
- BARELLI, N. **Estudo químico e geotécnico das reações de solo tropical com cal hidratada**. Eclética Química, São Paulo, v.17, p.25-39, 1992.
- BATISTA, C. F. N. **Pesquisa solo-cal**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 10., 1969. Salvador, BA. Anais..., Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Pavimentação (ABP), p.114-142, 1969.
- BAUER G., CARVALHO, J. B. **Estabilização dos solos lateríticos com cal: propriedades geotécnicas, reações e produtos formados**. 6º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, Salvador, p. 207-211, 1990.
- BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I.; TODRES, H. A. **Stabilization of clay soils by Portland cement or lime – a critical review of literature**. PCA R&D Serial N°2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 60p., 2003.
- BELL, F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils. **Engineering Geology**, n. 42, p.223-237, 1996.
- BANCO NACIONAL DE HABITAÇÃO. **Tecnologias simplificadas para a construção habitacional: resumo de experiências realizadas**. Rio de Janeiro, 27 p, 1983.
- BOHN, H. L. **Soil chemistry**. New York: John Wiley, 329p, 1979.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 12th ed., Upper Saddle Rive, NJ: Prentice-Hall, 881 p, 1999.
- CARDOSO, D. L. **Contribuição à identificação e tratamento dos solos expansivos da região de Viçosa-MG**. Viçosa:UFV, 1994. 194p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 1994.

CASTRO F. J. C. de O. **Um estudo difratométrico (RX) da interação pozolânica: argilominerais do solo e hidróxido de cálcio.** In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro. Anais... 16p, 453-458, 1981.

CASTRO, E.; SERAFIM LUIS, A. **Solo-cal na pavimentação de estradas e aeródromos.** Memória nº. 450, Lisboa, Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), p. 45-51, 1974.

COLLIS-GEORGE, N.; BOZEMAN, J. M. Double layer theory for mixed ions systems applied to the moisture content of clays under constraint. **Austr. J. Soil Res.**, 8: 239-258, 1970.

CRISTELO, N.; JALALI, S. Estabilização química de um solo residual de granito. **Geotecnia**, n.101, p. 25-40, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 201: Solo-cimento: compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, 4 p, 1994_a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 202: Solo-cimento: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio.** Rio de Janeiro, RJ, 7 p, 1994_b. (limites para aceitação de cp).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** 3^a ed., Publicação nº XXX, Rio de Janeiro, RJ: Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa (DNIT), Instituto de Pesquisas Rodoviária (IPR), Publicação IPR-719, 274 p., 2006.

DIAMOND, S.; KINTER, E. B. Mechanisms of soil lime stabilization: an interpretive review. **Highway Research Record**, Washington, n. 92, 1965.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, 212p, 1997.

- FERRAZ, R. L. **Contribuição ao Estudo da Estabilização de Solos para Fins Rodoviários e Habitacionais**. Viçosa: UFV, 1994. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 1994.
- FONTES, M. P. F., **O solo como um sistema disperso**. Material Didático: Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa, p.18-56, 1990_a.
- FONTES, M. P. F., **Troca Iônica**. Material Didático: Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa, 71p, 1990_b.
- FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v. 58, n.3, p. 627-646, 2001.
- GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 1ª ed. São Paulo: PINI, 99 p, 1997.
- GUIMARÃES, J.E.P. **Estabilização de solos**: nova e importante aplicação da cal, seus conceitos e suas vantagens. Boletim nº 5, São Paulo, SP: ABPC, 67 p., 1971.
- HARTY, J. R. i THOMPSON, M. R. Lime reativity of tropical and subtropical soil. **Highway Research Record**, Washington, n.442, p.102-112, 1973.
- HERRIN, M. i MITCHELL, H. Lime-soil mixtures. **Highway Research Board Bulletin**, Washington, n. 304, p. 99-121, 1961.
- HILT, G. H., DAVIDSON, D. T. Lime fixation in clayey soils. **Highway Research Record**, Washington, n. 262, p. 20-32, 1960.
- INGLES, O. G. & METCALF, J. B. **Soil stabilization principles and practice**. New York, E.U.A, Swikey e Sans, 374 p, 1973.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. New York, USA: John Wiley, 582 p, 1979.
- LIMA, D. C.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; SILVA, C. H. C.; PEREIRA, R. S.; TRINDADE, T. P.; BARBOSA, P. S. A. **A experiência da UFV no emprego de estabilizantes químicos em estradas florestais**. In: 6º Simpósio Brasileiro sobre colheita e transporte florestal, 2003, Belo Horizonte, MG. Proceedings..., Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais (SIF), p. 69-117, 2003.

- LIMA, D. C. **Algumas considerações relativas a aspectos da estabilização dos solos, em particular à estabilização solo-cal.** 1981. 171 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 1981.
- LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização dos solos III: Mistura solo-cal para fins rodoviários.** Caderno Didático n.334, Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 40 p, 1993.
- LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.** Porto Alegre: UFRGS, 2004. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- LU, L. W., DAVIDSON, D. T., HANDY, R. L., LAGUROS, J. G. The calcium:magnesium ratio in soil lime stabilization. **Highway Research Record**, Washington, Bulletin n. 36, p. 16-29, 1961.
- MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais.** Pini, São Paulo, 1994.
- MENDONÇA, A. A. **Caracterização de misturas solo-cal.** Viçosa: UFV, 1998. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- MENDONÇA, A. A.; SANTOS, M.F.; LIMA, D.C.; BUENO, B.S.; FONTES, M.P.F. **Resistência Mecânica de Misturas Solo-Cal: Estudo de Caso com Dois Solos de Viçosa-MG.** In: 30^a RAPv, Salvador, 24 a 29 de novembro, 1996.
- MEURER, E. J. **Fundamentos de química dos solos**, 3^a Ed. Porto Alegre, EVANGRAF, 285p, 2006.
- MITCHEL, J.K., HOOPER, D.R. Influence of time between mixing and compaction on properties of a lime-stabilized expansive clays. Bulletin, **Highway Research Board**, Washington, n. 304, p. 14-31, 1961.
- MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior.** New York, NY, USA: John Wiley, Second Edition, 437 p.,1993.
- MOH, Z.C. Soil stabilization with cement and sodium additives. **Journal of the Mechanics and Foundations Division**, 88 (6): 81 -105, 1962.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Pini, São Paulo, 1997.

- NOBREGA, M. T. **As reações dos argilominerais com a cal**. Associação Brasileira de Produtores de Cal, Boletim 14, São Paulo, p.57-78, 1985.
- NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 213p, 1995.
- NOGAMI, J.S., COZZOLINO, V.M. N **Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. Solos e Rochas**, v.16, n.2, p. 77-91, 1993.
- O' FLAHERTY, C. A. **Highway engineering**. London, Edward Arnold, V.2, 458p, 1979.
- OSULA, D. O. A. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. **Engineering Geology**, v. 42, n. 1, p. 71-81, 1996.
- PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 13ª ed., São Paulo, SP: Globo S.A., 435p, 1998.
- PINTO, C.S. **Estudo da avaliação da capacidade de suporte de um solo pela adição de pequena quantidade de cal ou de cimento**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. São Paulo, SP, 41p., 1964.
- PINTO, C. S. **Estudo de solo-cal com solos brasileiros**. Publicação no 64, Rio de Janeiro, RJ: Instituto de Pesquisas Rodoviária (IPR), 17 p., 1965.
- RAIJ, B. van; PEECH, M. **Electrochemical properties of some oxisols and anfisols of the tropics**. Soil Science Society of America Proceedings, v.36, p. 587-593, 1972.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S. & BATAGLIA, O.C. **Análise química de solo para fins de fertilidade**. Campinas, Fundação Cargill, 170p, 1987.
- RICO, A.; DEL CASTILLO, H. **La ingenieria de suelos en las vias terrestres**. México, D.F.: Editorial Limusa S.A., vol. 2, 643 p, 1977.
- SANT'ANA, A.P. **Caracterização tecnológica de misturas solo-escória de alto forno granulada moída para fins rodoviários**. Viçosa: UFV, 2003. 71p. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa – 2003.
- SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, 1º V, 746p 1997.
- SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo, SP: Pini Ltda., 2º V., 671 p, 2001.

- SILVA, D. P. **Estudo do comportamento reológico de solos estabilizados com cimento - processos gerais de estabilização.** Lisboa, Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 343 p, 1968.
- TAN, K. H. **Principles of soil chemistry.** New York : M. Dekker, 362p, 1993.
- THOMPSON, M.R. Lime reactivity of Illinois soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.** ASCE, v.92, p.67-92. 1966.
- THOMPSON, M.R. **The significance of soil properties in lime-soil stabilization.** Civil Engineering Studies, Highway Engineering Series, No. 13, Illinois Cooperative Highway research Program Series No. 23, University of Illinois, 1964.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **State of the art - lime stabilization: reactions, properties, design, construction.** Report no. 180, Washington, DC: TRB, 31 p, 1976.
- TRINDADE, T. P., CARVALHO, C.A.B., SILVA, C.H.C., LIMA, D.C., and BARBOSA, P.S.A. **Resilient modulus of structured/cemented soils stabilized with cement.** Symposium on Resilient Modulus Testing for Pavement Components, ASTM STP 1437, G.N. Durham, W.A. Marr and W. DeGroot, Eds., American Society for testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2003.
- TRINDADE, T. P. **Caracterização tecnológica de solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em estradas e em obras geotécnicas de caráter ambiental.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa: Imprensa Universitária, 254 p, 2006. (Tese de Doutorado).
- VAN OLPHEN, H. **An introduction to clay colloid chemistry for clay technologists, geologists, and soil scientists.** New York: Interscience, 310p, 1963.