**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**CARACTERÍSTICAS E MECANISMO DE
ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS COM CAL E
CIMENTO EM PISTA EXPERIMENTAL**

Maria Teresa de Nóbrega

Orientador: Prof. Dr. Adilson Carvalho

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

**São Paulo
1995**

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005340

Aos mestres,

Armand Chauvel e

Job Nogami,

dedico

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABELAS	VIII
ÍNDICE DE PRANCHAS	X
AGRADECIMENTOS	XI
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XV

INTRODUÇÃO

Capítulo I

OS SOLOS TROPICAIS NA ENGENHARIA	5
---	---

1. Comportamento hídrico e mecânico	7
2. O papel da argila na organização e comportamento dos solos	11

Capítulo II

ESTABILIZAÇÃO COM ADITIVOS PRINCÍPIOS E MECANISMOS	16
1. Solo-cal	17
2. Solo-cimento	24
2.1. Cimento	25
2.2. Mecanismos da estabilização com o cimento	35

Capítulo III

ÁREA DE ESTUDO	39
1. Características gerais da pista experimental e dos segmentos de estudo	42
2. Os materiais empregados	46
3. Técnicas de construção das bases estabilizadas	56
4. Características e comportamento da base	58
4.1. Características físicas, hídricas e mecânicas	60
4.2. Análise do tráfego e comportamento da pista	73

Capítulo IV

MÉTODO DE ESTUDO E TÉCNICAS DE ANÁLISES	89
1. Metodologia	90
2. Amostragem de pista e jazidas	91
3. Técnicas de análises	92
3.1. Lâminas delgadas	94
3.2. Micromorfologia	95
3.3. Análises químicas	99
3.4. Mineralogia	104

Capítulo V

OS SOLOS E AS MISTURAS	109
1. Os solos	110
1.1. Características morfológicas, químicas e mineralógicas	110
1.3. O efeito da compactação nos Latossolos - LR e LE	121
2. Misturas estabilizadas	126
2.1. Características morfológicas das bases	129
2.2. Características geoquímicas: solos naturais e misturas	138
2.3. Mineralogia	147
3. As organizações microestruturais, transformações e neo-sínteses	162
3.1. Segmento SCC/LR 1	162
3.2. Segmento SCC/LR 2	184
3.3. Segmento SCC/LE	187
3.4. Segmento CCC	196
3.5. Segmento CC	206
3.6. Síntese dos resultados	212

Capítulo VI

AS TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO E O PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO	
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	216
1. Os fatores condicionantes	217
1.1. Natureza química e mineralógica dos materiais e dos aditivos	217
1.2. Os efeitos das técnicas de construção	220
2. Natureza das reações desencadeadas	225

CONSIDERAÇÕES FINAIS	229
ANEXO (Terminologia Micromorfológica)	231
BIBLIOGRAFIA	234

ÍNDICE DE FIGURAS

01. Efeito do tempo de manipulação sobre os valores do Limite de Liquidez de uma argila laterítica.	9
02. Variação do consumo de cal (Cc%) em função do tempo e segundo a natureza do material	23
03. Variação da resistência à compressão simples em função do tempo e segundo a natureza do material.	23
04. Representação esquemática da hidratação do cimento Portland em temperatura ambiente.	33
05. Cimentação nos pontos de contato entre os grãos grosseiros.	36
06. Mapa de localização da pista experimental Santa Mariana - Porto Quebra Canoa.	40
07. Mapa esquemático dos solos na área e arredores da pista Santa Mariana - Porto Quebra Canoa.	41
08. Secções transversais tipo dos segmentos selecionados.	45
09. Esquema sintético dos principais níveis de alteração e pedogênese sobre rochas básicas - perfil laterítico completo - Ribeirão Preto-SP.	53
10. Variação da resistência à compressão simples em função dos teores de cal e cimento.	59
11. Efeito do tempo na evolução da resistência à compressão simples dos solos para diferentes combinações de teores de cal + cimento.	61
12. Variação da densidade aparente seca em relação ao teor de umidade em diferentes pontos ao longo dos segmentos com base de solo/cal/cimento.	65
13. Variação da densidade aparente seca em relação ao teor de umidade em diferentes pontos ao longo dos segmentos com base de cascalho-cal e cascalho-cal-cimento.	66
14. Variação do índice de vazios, índice de água e grau de compactação em diferentes pontos ao longo dos segmentos com base de solo-cal-cimento.	69
15. Relação entre os valores de capacidade de suporte (CBR) e o grau de compactação no segmento SCC/LR 1.	71

16. Variação da capacidade de suporte (CBR) e do grau de compactação ao longo do segmento SCC/LR 1.	71
17. Variação do índice de vazios, índice de água e grau de compactação em diferentes pontos ao longo dos segmentos com base de cascalho-cal e cascalho-cal-cimento.	72
18. Volume diário de tráfego - distribuição por tipo de veículo	77
19. Linha elástica e raio de curvatura de uma bacia de deformação.	82
20. Evolução dos defeitos da pista Mariana - Porto Quebra Canoa, levantados em três campanhas de avaliação do estado da superfície.	86
21. Esquema de amostragem ao longo da pista e da base.	93
22. Difratoograma de raios-X da fração argila do Latossolo Roxo.	113
23. Espectro infravermelho do Latossolo Roxo (amostra total).	113
24. Diagrama triangular do sistema Fe_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 . Latossolo Roxo.	116
25. Difratoograma de raios-X da fração argila do Latossolo Vermelho-escuro.	118
26. Espectro infravermelho do Latossolo Vermelho-escuro (amostra total).	118
27. Diagrama triangular do sistema Fe_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 . Latossolo Vermelho-escuro.	120
28. Representação esquemática das fases constituintes do solo	124
29. Efeito da compactação na distribuição volumétrica das fases sólida, líquida e gasosa constituintes dos solos	124
30. Relações volumétricas entre as fases constituintes das bases nos pontos amostrados	128
31. Variação das razões Ca/Elementos químicos em relação ao teor de cálcio.	143
32. Difratoogramas de raios X das diferentes organizações e materiais identificados na mistura da base SCC/LR 1	150
33. Difratoogramas de raios X das diferentes organizações e materiais identificados na mistura da base SCC/LR 2	150
34. Difratoogramas de raios X das diferentes organizações e materiais identificados na mistura da base SCC/LE	151

35. Espectro infravermelho do material da base SCC/LR 1	153
36. Espectro infravermelho do material da base SCC/LR 2	154
37. Espectro infravermelho do material da base SCC/LE.	156
38. Difrátogramas de raios X das diferentes organizações e materiais identificados na mistura da base CC.	157
39. Difrátogramas de raios X das diferentes organizações e materiais identificados na mistura da base CCC.	157
40. Espectro infravermelho do material da base CC.	159
41. Espectro infravermelho do material da base CCC.	160
42. Diagrama de hidratação do sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$	172
43. Diagrama triangular do sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ - dos sítios 1 e 2	175
44. Diagrama triangular do sistema - SCC/LR 1, centro da camada, cristalárias	175
45. Análises químicas pontuais ao longo de corte transversal sobre o plasma denso e o plasma poroso - SCC/LR 1, corte 1 (sítio 1)	178
46. Composição química do plasma denso, do plasma poroso e da zona de transição ao longo do corte transversal 1, SCC/LR 1 (sítio 1)	179
47. Distribuição do CaO e MgO ao longo do corte 1, SCC/LR 1	179
48. Composição química do plasma denso e de cristalária (da zona de transição estreita) ao longo do corte transversal 2, SCC/LR 1 (sítio 2)	181
49. Distribuição do CaO e MgO ao longo do corte 2, SCC/LR 1	181
50. Análises químicas pontuais ao longo de corte transversal sobre cristalária - SCC/LR 1, corte 2 (sítio 2)	182
51. Análises químicas pontuais do segmento SCC/LR 2 (sítio 1)	189
52. Diagrama triangular do sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ - Segmento SCC/LE	195
53. Análises químicas pontuais ao longo de corte transversal sobre a "matriz mista" - CCC, corte 1 (sítio 1)	203
54. Variação da composição química da "matriz mista" ao longo do corte transversal 1 - CCC (sítio 1)	204

55. Distribuição do CaO e MgO ao longo do corte transversal 1 - CCC	204
56. Análises químicas pontuais ao longo de corte transversal sobre material "incolor" preenchendo cavidade - CCC, corte 2 (sítio 2)	205
57. Análises químicas pontuais ao longo de corte transversal sobre a "matriz mista" (atravessa uma cavidade) - CCC, corte 3	207
58. Análises químicas pontuais do segmento com base cascalho cal (CC)	211

ÍNDICE DE TABELAS

01. Principais compostos do clínquer do cimento portland	26
02. Influência da variação química na composição mineralógica do cimento portland	27
03. Características físicas e químicas de algumas amostras de cimento portland	30
04. Hidratação dos compostos do cimento	32
05. Características gerais dos segmentos selecionados para a pesquisa	44
06. Caracterização geotécnica da jazida 2	48
07. Caracterização geotécnica da jazida 3	50
08. Composição química e mineralógica das rochas vulcânicas na área da pista experimental e arredores	52
09. Composição química das cales empregadas nos segmentos de estudo	55
10. Características físico-hídricas da base ao longo dos segmentos e dos materiais de referência (solos e misturas preparadas em laboratório	63
11. Características físico-hídricas da base dos segmentos. Valores médios e coeficiente de variação (CV)	64
12. Contagem de veículos realizada no período de 23 a 25 de julho de 1991	75
13. Contagem de veículos realizada no período de 27 a 29 de agosto de 1991	75
14. Contagem de veículos realizada no período de 18 a 20 de julho de 1995	76
15. Valores de deflexão média e coeficiente de variação dos segmentos em dois períodos: 1990 e 1991	79
16. Valores de raios de curvatura e produto Rd, determinados nas campanhas de 1990 e 1991	83

17. Avaliação do estado da superfície-síntese das informações mapeadas pelo DER-PR em 1990 e 1993	85
18. Análises químicas pontuais (microsondagens) - Latossolo Roxo (jazida 2) - resultados normalizados a 100%	115
19. Análises químicas pontuais (microsondagens) - Latossolo Vermelho-escuro - resultados normalizados a 100%	119
20. Características físico-hídricas dos solos indeformado e após compactação	123
21. Principais características das bases nos pontos amostrados - aspectos macromorfológicos	135
22. Análise química total dos solos e das misturas - ataque triácido	139
23. Análise química total das diferentes organizações e materiais identificados nas misturas - ataque triácido	146
24. Análises químicas pontuais (microsondagens) - SCC/LR 1, sítios 1 e 2 - resultados normalizados a 100%	174
25. Análises químicas pontuais - SCC/LR 1, cristalárias 1 e 2	176
26. Análises químicas pontuais - Segmento SCC/LR 2, sítios 1 e 2	188
27. Análises químicas pontuais - Segmento SCC/LE, sítios 1 e 2	194
28. Análises químicas pontuais - Segmento CCC, sítios 1 e 2	202
29. Análises químicas pontuais - Segmento CC	210

ÍNDICE DE PRANCHAS

I - Micromorfologia dos solos	112
II - Morfologia dos solos - Efeito da compactação	122
III - Segmento SCC/LR 1	164
IV - Segmento SCC/LR 1 - Imagens de raios X	167
V - Segmento SCC/LR 1 - Microscopia eletrônica de varredura	169
VI - Segmento SCC/LR 2	186
VII - Segmento SCC/LE	191
VIII - Segmento SCC/LE - Imagens de raios X	193
IX - Segmento CCC	198
X - Segmento CCC - Imagens de raios X	200
XI - Segmento CC	208

AGRADECIMENTOS

Quero expressar os meus sinceros agradecimentos a várias pessoas e entidades que, direta ou indiretamente, colaboraram no desenvolvimento deste trabalho:

- ao meu orientador, Prof. Dr. Adilson Carvalho, e ao Prof. Dr. Adolpho José Melphi agradeço, em primeiro lugar, pela confiança, incentivo e amizade que sempre marcaram o nosso relacionamento ao longo desses anos; em segundo lugar, por terem proporcionado os meios técnicos e financeiros para a realização da pesquisa;

- aos Drs. Armand Chauvel e Jean Delvigne, pela amizade, incentivo e ensinamentos;

- ao Dr. Claude Gense, pesquisador da ORSTOM, pela acolhida cordial na ORSTOM, Centro de Bondy, e por todo o seu apoio técnico e científico;

- ao Geólogo Luiz Antonio Aranovich, ex-chefe da Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento do DER-PR, e ao seu sucessor, Engº José Antonio de Araujo Fernandes, pela oportunidade de acompanhamento das construções das pistas experimentais e pelo acesso aos dados utilizados nesta pesquisa;

- a Esteve Boileau, pelo convívio, o apoio e as discussões sobre o tema;

- ao CNPq pela concessão de auxílios;

- a todas aquelas pessoas que trabalharam comigo lado a lado ensinando, auxiliando, dividindo tarefas e "tempo", tornando agradável e profícuo o estágio no Centro de Bondy. Agradeço em particular a paciência e colaboração de Mme. Annie Bouleau na microscopia eletrônica, de Mme. G. Millot nas análises com raios X, de Mme. Huguette Guénin na realização das análises químicas e de Mme. Therese Cheron na preparação dos materiais. Agradeço igualmente a Alain Blot, Jean-Marie Wackerman, Boris Volkof, Martine Gerard, David Bokeke e Nittaya Nintaraki pelo carinho e amizade - o suporte emocional necessário para a realização de qualquer trabalho;

- a Hubert Remy e Michel Fialin pelo acesso e acompanhamento na utilização da microsonda na Universidade de Jussieu - Paris IV;

- ao Dr. J. J. Trescasses pela colaboração na pesquisa e realização de análises no "Laboratoire de Petrologie de la Surface", Universidade de Poitiers;

- aos amigos César e Angélica Varajão pela acolhida e pelos bons momentos

de convívio familiar que me proporcionaram em Poitiers;

- aos amigos Nelson L. Gasparetto e Oscar Vicente Q. Fernandez pela ajuda valiosa na realização dos trabalhos de campo;

- à Verônica Grabieli Santos e aos funcionários da Laminação (Instituto de Geociências - USP), especialmente ao Cláudio Hopp que sempre me atendeu com eficiência e cordialidade;

- à Maria Madalena B. M. Ventura e à Nícia Maria Brandão pelo atendimento gentil que sempre me dispensaram;

- aos amigos do Instituto de Geociências - USP que, de diferentes maneiras, contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal, em particular aos professores Murilo R. Lima (in memoriam), Maria Cristina de Toledo, Marcos Egídio da Silva, Joel Sigolo e Sonia Barros de Oliveira;

- à Profa. Dra. Sonia Barros de Oliveira, enquanto Coordenadora de Comissão de Pós-Graduação, pelo apoio e compreensão na fase final deste trabalho;

- à Maria Aparecida de Lima Savi (Secretária), ao Laércio Miguel Richter (Laboratorista) - funcionários do Departamento de Geografia (UEM) - e à Leyde Sagutti (Geógrafa) pela ajuda efetiva que recebi e que facilitaram o cumprimento de minhas outras obrigações;

- ao José Luiz de Carvalho pela execução dos desenhos e ao Antonio Carlos Locatelli pelos serviços fotográficos;

- aos colegas professores do Departamento de Geografia -UEM: César Miranda Mendes, Dalton Moro, Gilda Cabral Benaducce, Wilson Teixeira, Maria Eugênia C. Ferreira, Paulo Nakashima, Myriam S.R. Nakashima, Deise Regina E. Queiroz, José Cândido Stevaux e Antonio Giacomini Ribeiro;

- ao Eng^o Rubens Brazetti, do DER-PR, pelas discussões e pelo fornecimento de dados complementares da pista experimental e todos os técnicos do DER-PR de laboratório e de campo que prestaram a sua colaboração;

- ao Sr. Inéia de Souza Moraes pela realização dos serviços tipográficos;

- à Suzette Caselatto, amiga, pela revisão do texto;

- ao Sr. Joacida de Arruda, amigo, pela versão do resumo;

- à Lúcia A. de Nóbrega, irmã, por toda a ajuda;

- ao José Edézio da Cunha, companheiro, pela realização de todas as pequenas e grandes tarefas para que eu pudesse concluir este trabalho.

RESUMO

O objetivo principal da pesquisa é contribuir para o entendimento dos processos e mecanismos desencadeados pela adição de cal e cimento a materiais ferralíticos em condições de pista. Neste estudo foram analisados materiais da base de uma pista experimental (PR-518) estabilizados com adição de cal + cimento ou apenas cal.

A PR-518, que liga Santa Mariana ao Porto Quebra Canoa, foi construída pelo DER-PR (Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná) em 1987, tem 29,5km de extensão, está localizada na região Norte do Estado do Paraná e atravessa áreas de ocorrência de Latossolo Roxo, Terra Roxa Estruturada e Latossolo Vermelho-escuro - solos tropicais de textura argilosa.

Dos 61 segmentos que compõem a estrada foram estudados cinco, que são representativos dos tipos de misturas e técnicas empregadas: segmento 4 (mistura de Latossolo Roxo + 4% de cal cálcica + 5% de cimento portland - SCC/LR 1); segmento 10 (Latossolo Roxo + 4% de cal dolomítica + 5% de cimento portland - SCC/LR 2); segmento 55 (Latossolo Vermelho-escuro + 2% de cal cálcica + 3% de cimento portland - SCC/LE); segmento 8 (cascalho de basalto alterado + Latossolo Roxo + 4% de cal cálcica + 5% de cimento portland - CCC); segmento 41 (cascalho de basalto alterado + Latossolo Roxo + 5% de cal dolomítica - CC).

A pesquisa foi desenvolvida através de análises morfológicas, realizadas a níveis macro, meso e microscópicos, complementadas por análises mineralógicas por raios X e infravermelho, análises químicas qualitativas e quantitativas sobre amostra total (ataque triácido) e pontuais (microsondagens). Paralelamente foi efetuado, a partir de dados fornecidos pelo DER-PR, o levantamento das características físico-hídricas e mecânicas dos segmentos logo após a construção; o acompanhamento do comportamento estrutural e do estado da superfície da pista ao longo do tempo.

Os resultados obtidos mostram que de um modo geral as bases apresentam problemas relacionados à etapa de construção: o grau de compactação variável ao longo do segmento e da espessura da camada; a umidade acima ou muito abaixo do teor ótimo de compactação; a homogeneização deficiente da umidade e da mistura dos materiais com os aditivos, etc.

Nos pontos amostrados a morfologia dos materiais das bases refletiu esses problemas através de diferenciações de porosidade, concentração ou ausência de aditivos, organizações particulares do plasma e de outros constituintes.

As misturas solo-cal-cimento se caracterizam por apresentar agregados (ou zonas) de plasma não afetado, ou pouco afetado pelos aditivos, mais sensíveis às variações e esforços de origem hídrica e mecânica. Estão envolvidos por plasma transformado por reações com os aditivos em diversos graus, contendo os produtos de hidratação do cimento e de reação pozolânica da cal (silicatos, aluminatos e

aluminossilicatos de cálcio hidratados), menos sensível às variações hídricas e mecânicas (sem fissuras) e mais resistente.

As misturas com cascalho de basalto alterado são constituídas por fragmentos líticos (cascalho de basalto), volumes de material do solo do subleito e uma "matriz mista". Foi principalmente a "matriz", gerada pela incorporação do solo e dos produtos do córtex de alteração do basalto, que se misturou e reagiu com os aditivos.

Cada uma dessas organizações é constituída por materiais química e mineralogicamente diversificados.

Dois aspectos importantes devem ser ressaltados:

- 1) a influência da qualidade e da composição química da cal aplicada - as neoformações minerais, transformações e reorganizações do material das misturas são mais evidentes naquelas onde foi empregada a cal cálcica do que naquelas com cal dolomítica (com ou sem cimento). Estas diferenças implicam em maior estabilidade das misturas tratadas com cal cálcica como comprovam também os dados de desempenho da pista;
- 2) as técnicas de construção das bases são as responsáveis pelas condições da mistura dos constituintes dos solos com os aditivos, da homogeneização da umidade (necessária para as reações de hidratação do cimento e pozolânicas) e grau de compactação. Ou seja, criam o ambiente físico e químico onde ocorrem as reações que promovem a estabilização. São também responsáveis, ao lado das reações químicas e físico-químicas desencadeadas pelos aditivos, pela morfologia do material.

Nas misturas com cascalho, os fragmentos líticos "armam" o material enquanto os aditivos mantêm estável a "matriz". Nas misturas solo-cal-cimento, ao contrário, a "armação" é produzida pelo plasma do solo original transformado e enriquecido em produtos cimentantes (resultantes da hidratação e das reações pozolânicas), que isola volumes de material mais instável.

ABSTRACT

The prime aim of this research is to contribute for the understanding of the processes and mechanisms brought about by the addition of lime and portland cement to ferralitic materials from an experimental road (PR-518) stabilized with addition of lime + cement or lime only, have been analysed.

PR-518, which connects Santa Mariana to Porto Quebra Canoa has been built by DER-PR (Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná) in 1987, is 29,5km long, is in Paraná North region and crosses areas where can be found "Latossolo Roxo", "Terra Roxa Estruturada" and "Latossolo Vermelho-escuro" - tropical soils clayed texture.

Of the 61 parts that make up the road, five have been studied, which represent the kinds of applied mixture and techniques: part 4 (mixture of "Latossolo Roxo" + 4% of calcitic lime + 5% portland cement - SCC/LR 1); part 10 ("Latossolo Roxo" + 4% dolomitic lime + 5% portland cement - SCC/LR 2); part 55 ("Latossolo Vermelho-escuro" + 2% calcitic lime + 3% portland cement - SCC/LE); part 8 (gravel of weathered basalt + 4% calcitic lime + 5% portland cement - CCC); part 41 (gravel of weathered basalt + 5% dolomitic lime - CC).

The research has been developed through morphological analysis (macro, meso and microscopic levels) complemented by mineralogical analysis by x-ray and infrared, qualitative and quantitative chemical analysis on total sampling (triacid attack) and by points (microprobes). At the same time it has been put into effect, based on the data supplied by DER-PR, the conclusion of physical-hydric characteristics and mechanics of the parts soon after the building; the follow-up structural behaviour and surface condition of the road during a period of time.

The results obtained show that, in general, the bases depict problems related to a building stage: compaction grade variable at the length of the part and the layer thickness; moisture content above or below of the optimum PROCTOR; deficient homogenization of the moisture and the mixture of the materials with the additive, etc.

The morphology of the materials of the bases reflected these problems through porosity differentiations, concentration or lack of additives, singular organizations of the plasma and other constituents.

The soil-lime-cement mixtures are characterized by showing zones of plasma not affected, or not so affected by the additives, more sensible to the variations and efforts from hydric and mechanical origin. They are involved by plasma transformed by reactions with the additives in several grades, containing the products of hydration of the cement and of lime pozzolanic reaction (calcium silicate hydrate, calcium aluminate hydrate and calcium aluminosilicate hydrate), less sensible to hydric and mechanic variations (without joint planes), and more resistant.

The mixtures with weathered basalt gravel are made up by lithic fragments (basalt gravel),

volumes of soil material from the sublayer and "mixed matrix". It was mainly the "matrix", generated by the soil incorporation and the basalt alteration cortex products, that mixed and reacted with the additives.

Each one of those organizations are constituted by chemically and mineralogically diversified materials.

Two important aspects must be highlighted:

1) the influence of the quality and of the chemical composition of the applied lime - the mineral newformations, transformations and the material reorganizations of the mixtures are more evident in those where the calcic lime was applied than in those with dolomitic lime (with or without cement). These differences imply a higher stability of the mixtures treated with the calcic lime as confirmed by de road accomplishment data as well;

2) the building techniques of the bases are responsible by the conditions of the constituents mixture of the soils with the additive, of the moisture homogenization (necessary for the cement hydration reactions and pozzolanics) and compactation grades. That is, they create the chemical and physical environment where the reactions that bring about the stabilization occur. They are also responsible, along with physical-chemical and chemical reactions brought about by the additives, by the material morphology.

In the mixture with gravel, the lithic fragments build the material structure while the additives keep the matrix stable. In the soil-lime-cement mixtures, on the contrary, the "structure" is provided by the original soil plasma transformed and enriched in cement products (result of the hydration and of pozzolanic reactions), that isolates more instable material volumes.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico de uma região impõe a existência de uma malha rodoviária que assegure a entrada dos insumos necessários à produção e ao escoamento e distribuição desta. É comum no Brasil, principalmente em áreas de ocupação recente, perder-se a produção de uma safra por insuficiência de vias transitáveis o ano todo.

A construção de novas rodovias exige, por outro lado, grandes investimentos, principalmente quando atravessam áreas de solos pouco ou não apropriados em termos geotécnicos. As técnicas convencionais de construção, nesses casos, exigem a utilização de materiais importados de outras áreas, muitas vezes distantes, o que onera ainda mais os custos.

A estabilização de solos procura tornar os materiais naturalmente impróprios em materiais adequados à construção, corrigindo as suas propriedades deficientes (expansão, contração, por exemplo) e/ou aumentando a sua resistência, seja através de correção granulométrica ou de aplicação de aditivos químicos. Busca-se, assim, minimizar os gastos e obter pavimentos de baixo-custo.

A necessidade crescente da expansão da malha rodoviária em várias partes do país, principalmente com relação às estradas secundárias, tem despertado o interesse de alguns órgãos e pesquisadores do setor para a busca de soluções técnicas que diminuam os custos de construção. Como exemplo cita-se a técnica do "solo arenoso fino", desenvolvida e estudada por VILLIBOR (1981) e CORREA (1982), inicialmente empregada em São Paulo e que está se difundindo em outros Estados.

A técnica de estabilização solo-cimento, mais conhecida, tem sido empregada principalmente na construção de rodovias principais. É, em geral, indicada para solos de textura mais arenosa e visa principalmente o aumento da resistência. Em muitos casos, entretanto, os solos locais também não se prestam a esse tipo de estabilização, sendo então removidos e substituídos por outros materiais mais adequados a essa técnica.

Para os solos de textura argilosa, que recobrem grandes áreas do território nacional, não existe uma técnica normalizada ou suficientemente pesquisada para permitir a sua utilização.

Nos países das zonas temperadas são empregadas várias técnicas para a estabilização de materiais argilosos, todas fundamentadas em processos químicos e físico-químicos, com o objetivo de inibir as propriedades características dos minerais de argila (plasticidade alta, contração e expansão elevadas, grande retenção de umidade, etc.). A estabilização de solos com cal utilizada em várias fases da construção de estradas, incluindo a preparação dos canteiros de obras e redução da umidade dos materiais a serem compactados, tem encontrado dificuldade para a sua aceitação no mundo tropical, em especial no Brasil. O desconhecimento dos mecanismos desencadeados pela adição de cal aos solos tropicais tem sido o principal problema. Os procedimentos de aplicação e execução dos trechos em geral não respeitam os princípios físico-químicos da técnica. Ainda, a recomendação da aplicação da cal tem sempre o objetivo do aumento da capacidade de suporte, nem sempre alcançado nos níveis desejados com os solos tropicais.

O Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER-PR) vem, desde 1985, desenvolvendo um programa experimental de pavimentação de estradas vicinais e alimentadoras (ARANOVICH & OGURTSOVA, 1987) e, entre as alternativas testadas, destaca-se a estabilização com adição de cal e cal+cimento. São várias pistas construídas com bases de solo-cal e solo-cal-cimento, utilizando principalmente os solos argilosos oriundos de basaltos e seus associados e, em alguns casos, o "cascalho de basalto alterado". Os trechos experimentais estão espalhados por toda a região do Terceiro Planalto Paranaense, do norte até o sul, em áreas de ocorrência principalmente do Latossolo Roxo e da Terra Roxa Estruturada e, secundariamente, do Latossolo Vermelho-escuro.

No âmbito acadêmico, o Instituto de Geociências - USP e a ORSTOM, através de um programa conjunto de pesquisa, vêm também realizando estudos de estabilização de solos tropicais com adição de cal. O objetivo principal é entender as reações desencadeadas entre os solos e a cal e contribuir para a determinação de critérios e parâmetros para aplicação da técnica mais adequados às condições tropicais. Os trabalhos de CHAUVEL & NÓBREGA (1980), CARVALHO et al (1981), NÓBREGA & GUIMARÃES (1982), ROSSI et al (1983), CHAUVEL et al (1983), NÓBREGA (1988), BOILEAU et al (1992), ROSSI et al (1992) apresentam os resultados de pesquisas, desenvolvidas dentro desse programa, sobre o comportamento da Terra Roxa

Estruturada, Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-escuro (amostras de perfis típicos) e duas alteritas (granito e gnaiss) com adição de cal, em corpos de prova moldados em laboratório.

O programa experimental do DER-PR enseja a oportunidade de complementar os estudos realizados pelo IGUSP/ORSTOM, com a investigação do processo de estabilização solo-cal, a sua evolução com o tempo e com o uso (tráfego), com os mesmos solos (Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-escuro), em condições de pista. Introduce um outro aditivo, o cimento portland, em combinação com a cal, possibilitando o estudo das interações solo-cal-cimento não consideradas nos trabalhos anteriores.

Assim, os objetivos deste trabalho são:

- o estudo dos materiais (Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho-escuro e "cascalho de basalto alterado") de pista estabilizada com cal e cal+cimento, nos seus aspectos geoquímicos, pedológicos, mineralógicos e morfológicos;
- contribuir para o entendimento dos processos e mecanismos desencadeados pela adição de cal e cal+cimento a materiais ferralíticos em condições de pista.

Esta pesquisa foi realizada sobre alguns segmentos de uma pista experimental, Santa Mariana - Porto Quebra Canoa (PR-518), localizada na região norte do Estado do Paraná.

A ênfase que se dá, neste trabalho, ao estudo dos materiais em condições de pista se deve ao fato dos resultados obtidos em laboratório nem sempre se repetirem nas estradas. Existem relatos de alguns casos de aplicação onde a adição de cal, em especial, se mostrou insuficiente ou até mesmo inócua, comprometendo o desempenho da estrada e culminando com a sua deterioração total após alguns meses de uso. Em outros, as melhorias desejadas foram obtidas e mantidas ao longo do tempo. Esse comportamento "aleatório" em pistas, contribui para o descrédito e desconfiança na técnica.

É importante conhecer, portanto, os mecanismos envolvidos na estabilização com os aditivos, cal ou cal+cimento, com os solos ferralíticos e verificar, também, em que medida as condições de execução dos trechos podem influenciar no processo.

No desenvolvimento do trabalho procurou-se mostrar inicialmente as principais características dos solos ferralíticos (ou "lateríticos"), aquelas que determinam o comportamento mecânico peculiar, conhecido na engenharia como "comportamento laterítico".

Em seguida, no capítulo II, apresenta-se uma síntese dos conhecimentos sobre a estabilização com cal e cimento, princípios e mecanismos. Foi dada atenção especial ao aditivo cimento portland, incluindo-se informações sobre composição química e mineralogia do clínquer e processos de hidratação. O objetivo principal é fornecer subsídios para que se entenda as formas de atuação de um e de outro aditivo.

No capítulo III, estão reunidos os dados sobre a pista experimental de Santa Mariana - Porto Quebra Canoa, os segmentos selecionados e os materiais (solos e aditivos) empregados. São apresentados, também, os resultados do controle tecnológico, realizado logo após a execução das bases, o acompanhamento de desempenho da estrada, a avaliação do estado da superfície e evolução do tráfego ao longo do tempo.

A pesquisa, propriamente, foi desenvolvida sobre as amostras das jazidas e das bases. Empregou-se um elenco de técnicas variado, tendo em vista a caracterização química, mineralógica e morfológica dos materiais naturais e das misturas estabilizadas, desde a escala macroscópica à submicroscópica. A metodologia e as técnicas utilizadas compõem o capítulo IV.

Os resultados obtidos são apresentados no capítulo V. Deu-se ênfase às características morfológicas, químicas e mineralógicas dos materiais naturais e das misturas; às reorganizações promovidas pela adição da cal e cimento, preparo das misturas na pista e compactação; à influência dos tipos de cales empregados; e às transformações e neossínteses geradas nas misturas.

Capítulo I

OS SOLOS TROPICAIS NA ENGENHARIA

Nas regiões tropicais, em função do clima, as rochas são submetidas a um intemperismo químico intenso, marcado principalmente pela hidrólise, que gera mantos de alteração espessos e solos ricos em óxidos e hidróxidos de ferro, de alumínio e argilo-minerais cauliníticos. Estes materiais, mesmo quando contêm uma fração fina importante, apresentam expansão e Índices de Plasticidade baixos, em desacordo com o indicado para as classes nas quais se enquadram em classificações geotécnicas.

A pesquisa por soluções técnicas que barateiem o custo de construção das estradas, principalmente aquelas vicinais e alimentadoras (mais numerosas, que dão acesso aos locais de produção), em região tropical, procura valorizar esses materiais tropicais e elaborar projetos compatíveis com as exigências locais ou regionais a que a estrada será submetida, tanto em termos físicos como econômicos. Para tanto, é necessário um conhecimento maior da natureza e do comportamento hídrico e mecânico dos solos tropicais, bem como uma adequação de processos de estabilização, dimensionamento e técnicas construtivas.

A Mecânica dos Solos, responsável pelo estudo e definição de parâmetros de utilização dos solos como materiais ou bases de sustentação (fundações), surgiu fundamentada na experiência com materiais das regiões temperadas. Este conjunto de conhecimentos foi estendido a todo o globo, principalmente com a divulgação e adoção das "classificações de solos internacionais". Desde o início, entretanto, percebeu-se que os materiais das regiões tropicais se comportavam mecânica e hidricamente de forma diferente daquela estipulada por tais classificações.

A partir do final da década de 1960 surge mais intensamente a necessidade de compreender esse comportamento particular, de procurar os parâmetros que o determinam e elaborar classificações de solos para a engenharia que considerem também esses materiais, como por exemplo aquela proposta por NOGAMI & VILLIBOR (1981).

Os materiais identificados como tropicais são designados pela engenharia como "lateritas e solos lateríticos" ou ainda "solos vermelhos tropicais". Com estes termos se referem a couraças, fragmentos de couraças, concreções ferruginosas, carapaças, depósitos argilosos ferruginosos, plintita e a solos de diferentes unidades pedológicas, já que muitos utilizam apenas a cor "vermelha" como referência.

A confusão foi gerada pela aplicação generalizada do termo "laterita", originalmente empregado por BUCHANAN (1807) para designar um material de construção usado na região de Malabar (Índia), que apresentava uma morfologia e propriedades particulares: quando fresco podia ser facilmente cortado em blocos e uma vez exposto ao ar endurecia irreversivelmente. Com o passar do tempo o termo foi estendido a todas as ocorrências argilosas ferruginosas e aluminosas, endurecidas (couraças) ou não. As definições foram se ampliando e se baseavam às vezes nas características morfológicas, às vezes nas físicas e às vezes no caráter químico. Incorporaram-se índices, o primeiro foi a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1.33$ (posteriormente elevada até 2), numa tentativa de padronização do uso do termo. Entretanto, à medida que se avançava no conhecimento dos materiais tropicais, aumentava a complexidade e com ela as controvérsias. As dificuldades envolvendo a aplicação do termo "laterita" e a tendência para uma definição genética levaram os pesquisadores (geólogos e pedólogos principalmente) ao seu abandono, restringindo-o ao emprego original de BUCHANAN. Os termos couraça, carapaça (ferruginosa e/ou aluminosa, às vezes manganífera), plintita, solos ferralíticos, "kaolisols", "latosols" e "oxisols" passaram a ser empregados para designar os diversos materiais antes identificados como "laterita" (MAIGNEIN, 1966).

No campo da engenharia o problema ainda persiste e vários autores como GIDIGASU (1976), BARATA (1981), AUTRET (1983), VARGAS (1985) e NOVAIS FERREIRA (1985) têm discutido as questões de identificação, classificação e terminologia desses materiais tropicais. A confusão existente dificulta a comparação e a generalização dos comportamentos geotécnicos observados. A utilização dos conhecimentos de áreas afins, como a pedologia e a geologia, e a preocupação em transformá-los em parâmetros de fácil determinação e com significado geotécnico para emprego na engenharia (rodoviária), são a tônica comum a todos eles.

Os materiais endurecidos encontrados em superfície ou sub-superfície são comumente empregados em muitos países africanos como testemunham AUTRET (1982,

1983), CHAGNAS & TIJOU (1976), HONOLD (1985), MESSOU (1981). As técnicas de construção (em especial a rodoviária) com esses materiais já são bem conhecidas. O problema maior surge no emprego dos "solos lateríticos", quando várias questões, tanto conceituais como técnicas, aparecem.

Diversas pesquisas e experiências de campo têm mostrado, segundo GIDIGASU (1976), que o comportamento dos solos lateríticos é influenciado pela sua gênese, características morfológicas, grau de intemperismo e composição química e mineralógica. As características geotécnicas e o desempenho dos solos lateríticos no campo podem ser, segundo o autor, interpretados através dos seguintes parâmetros: gênese e fatores pedogenéticos; grau de intemperismo; teor e mineralogia da fração argila.

Esses parâmetros são considerados nas diversas classificações pedológicas, onde os grandes tipos de solos são definidos em função da sua gênese e das suas propriedades fundamentais. As classificações pedológicas podem se constituir, portanto, em instrumentos valiosos para a engenharia. Para o seu emprego, bem como das cartas de solos, é preciso, contudo, que se reconheçam as relações existentes entre as características e propriedades pedológicas e o comportamento hídrico e mecânico dos materiais.

1. COMPORTAMENTO HÍDRICO E MECÂNICO

A variação do teor de umidade nos solos determina mudanças volumétricas, expressas pelos fenômenos de expansão e contração, e de estado de consistência, este último evidenciado pelos Limites d'Atterberg: Limites de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP). O Índice de Plasticidade ($LL - LP = IP$), caracteriza a extensão do estado plástico.

A intensidade desses fenômenos, assim como outras propriedades mecânicas - resistência, compressibilidade, etc... - são dependentes do teor da fração argila, da sua natureza mineralógica, de substâncias fixadas nas superfícies das partículas, do teor de umidade e da concentração e natureza eletrolítica da fase líquida (ROSENQVIST, 1959,

1962; AYLMOORE & QUIRK, 1962; OLSON & MITRONOVAS, 1962; GILLOT, 1968; TESSIER, 1980, 1984, 1990). São as diferentes forças interparticulares geradas no sistema argila-água, condicionadas por esses parâmetros, que se refletem nas propriedades mecânicas (AYLMORE & QUIRK, 1962; OLSON & MITRONOVAS, 1962; GILLOT, 1968).

As forças interparticulares, associadas aos esforços energéticos hídricos (sucção) e mecânicos a que o material foi submetido, determinam, por sua vez, a organização estrutural da fase sólida nos seus diferentes níveis, desde a unidade cristalográfica às unidades macroscópicas (TESSIER, 1984, 1990). O comportamento mecânico do material está, desta forma, intimamente relacionado com a microestrutura da fase argilosa e do solo como um todo.

A importância da microestrutura do solo como fator condicionante e indicador de propriedades mecânicas tem sido evidenciada em vários estudos (MITCHELL, 1956, 1976; LAFEVER, 1963, 1965; GILLOT, 1968; ODA, 1972; YONG & SHEERAN, 1973; COLLINS & MCGOWN, 1974, 1983).

Muitos solos tropicais, apesar de argilosos, apresentam, em condições naturais (indeformados), expansão, contração e Índices de Plasticidade baixos, enquanto as resistências são mais altas do que as de seus similares texturais das zonas temperadas. TOWNSEND et al. (1969), atribuem à estrutura granular a responsabilidade pelas qualidades geotécnicas desejáveis desses solos. Entretanto, a resistência elevada, a baixa plasticidade e a alta permeabilidade dos solos indeformados são, de acordo com GIDIGASU (1976), perdidas pelo amolgamento ou retrabalhamento do material (mistura e compactação) ou qualquer tipo de manipulação mecânica em presença de água. A causa desse fenômeno é atribuída também à degradação da estrutura granular, que torna o material mais plástico, e à presença de haloisita (COLLINS, 1985).

Uma das observações mais comuns é a variação dos Limites d'Atterberg: quanto mais manipulado é o material, maiores são as diferenças entre os valores obtidos, como bem demonstra o gráfico da Fig. 1, apresentado por SHERWOOD (1967).

NEWILL (1961) e TOWNSEND et al (1971) constataram que a remoção do ferro também modifica esses limites, em particular o Limite de Liquidez, que aumenta consideravelmente e promove, ao mesmo tempo, a destruição da estrutura granular.

Fig. 01: Efeito do tempo de manipulação sobre os valores do Limite de Liquidez de uma argila laterítica (SHERWOOD, 1967).

- 1 = 10 minutos de mistura manual
- 2 = 45 minutos de mistura manual
- 3 = 3 horas de mistura manual

As características da resistência mecânica, traduzida em termos de resistência ao cisalhamento e da compressibilidade dos solos tropicais, tem sido atribuída aos fatores pedogenéticos (LAMB, 1962; CRUZ, 1969; BALDOVIN, 1969; LOHNES et al, 1971; GIDIGASU, 1976, VAUGHAN, 1985), com ênfase particular aos processos de "laterização".

Segundo BALDOVIN (1969), quanto mais intenso o grau de "laterização", mais favoráveis são os parâmetros que determinam a resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito interno) e a compressibilidade. A relação estabelecida entre as propriedades pedológicas, resultantes de processos pedogenéticos, e as características de resistência dos solos tropicais (ferralíticos) permite, conseqüentemente, uma relação destas com a microestrutura dos solos, mais claramente evidenciada por DIAS & GEHLING (1985) e KUPPER et al (1985).

KUPPER et al (1985), caracterizaram o comportamento mecânico da "argila vermelha terciária", material de cobertura da Bacia Sedimentar de São Paulo, que corresponde, em termos pedológicos, a um Latossolo Vermelho-escuro, semelhante ao estudado nesta pesquisa. A análise foi realizada em uma espessura de 20 metros de material e constatou que, apesar da homogeneidade textural ao longo do perfil (cerca de 65% de fração argila), ocorre uma modificação da macro e microestruturas, refletida principalmente pelo índice de vazios, que apresenta uma redução a partir de 8 metros de profundidade. A mineralogia da fração argila também varia da mesma forma: da superfície até 8 m de profundidade o material é constituído por caulinita, gibbsita e óxi-hidróxidos de ferro; a profundidades maiores (> 8 m) passa a ser constituído por caulinita e pequena quantidade de illita (4,5% aproximadamente), a gibbsita desaparece e os óxi-hidróxidos de ferro diminuem ligeiramente. Os Limites d'Atterberg, assim como o ângulo de atrito interno do material, apresentam pequenas variações com a profundidade, enquanto que a coesão aumenta de forma significativa. A principal diferença entre as duas partes do perfil, segundo os autores, reside na estrutura do solo, a níveis macro e micromorfológicos e é ela a responsável pelas diferentes características geotécnicas reveladas: a parte superior apresenta estrutura microagregada e porosa; a parte inferior (> 8m de profundidade) apresenta um arranjo das partículas argilosas relativamente denso, quase sem agregados.

O papel da microestrutura tem sido, dessa maneira, reconhecido como fator

condicionante de comportamento mecânico dos solos lateríticos (LAMB, 1962; LOHNES et al., 1971; TOWNSEND et al., 1969 e 1971; WALLACE, 1973; GIDIGASU, 1976; MITCHELL & SITAR, 1982; ARNOLD, 1985; DIAS & GEHLING, 1985; OGUNSANWO, 1985; VAUGHAN, 1985), e a sua análise tem sido estimulada e sugerida como parâmetro diferenciador (COLLINS, 1985).

Os solos que apresentam o "comportamento laterítico" relatado pela engenharia são, dentro da classificação brasileira de solos, os Latossolos, que correspondem aos "oxisols" da classificação americana e aos solos ferralíticos da classificação francesa. São solos espessos, com textura homogênea ao longo do perfil, constituídos por material mineral em estado avançado de intemperismo, apresentando: fração argila composta preferencialmente por óxidos de ferro (hematita, goetita), óxidos de alumínio (gibbsita) e minerais de argila do grupo 1:1 (caulinita), índice $K_i < 2,2$; baixa capacidade de troca de cátions; inexistência de minerais primários alteráveis ($< 4\%$) e de resquícios da rocha mãe e saprólito; a textura franco-arenosa ou mais fina com baixos teores de silte. A estrutura apresenta aspecto maciço poroso "in situ" que se desfaz em forte muito pequena e pequena granular. Apresentam agregados com grande estabilidade e alto grau de floculação da fração argila (OLIVEIRA et al., 1992).

2. O PAPEL DA ARGILA NA ORGANIZAÇÃO E COMPORTAMENTO DOS SOLOS

Os solos argilosos em geral apresentam uma grande susceptibilidade às variações hídricas, que resultam em mudanças de volume (expansão e contração) e da microestrutura em diferentes níveis de organização (TESSIER, 1990). Essas mudanças de volume geralmente afetam: a porosidade, reduzindo ou modificando o tamanho e a forma dos poros; o plasma, promovendo a partir dos esforços gerados (tensão, tração, compressão) separações plásmicas do tipo "sliken-sides", orientações plásmicas segundo determinadas linhas criando padrões bimassépicos a latissépicos (GRIMALDI, 1981), ou em torno de grãos do esqueleto, etc.

A fração argila, que compõe o plasma dos solos, é a responsável por esse comportamento.

A fração argila consiste de uma assembléia de partículas, cujo tamanho é inferior a 2 μm , composta principalmente por silicatos de alumínio hidratados (argilo-minerais) associados a outros constituintes, como óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, produtos amorfos (de ferro, alumínio e sílica), carbonatos de cálcio, quartzo microcristalino, etc. Apresenta um comportamento físico-químico particular, resultante da grande superfície específica que desenvolve e das cargas elétricas negativas na superfície dos seus constituintes (principalmente os argilo-minerais).

As propriedades macroscópicas da matéria não dependem, entretanto, de acordo com TESSIER & PEDRO (1984), apenas da estrutura atômica das fases constituintes dessa fração, mas também, do tamanho, da forma e da disposição dos indivíduos cristalinos (ou partículas) uns em relação aos outros. Esses parâmetros vão influenciar o desenvolvimento e as características da superfície específica total da fase sólida, e todos os fenômenos que ocorrem na interface das fases sólido e líquido. Assim, as propriedades dos materiais não dependem apenas daquelas dos diferentes constituintes, considerando-se as suas proporções relativas. Os constituintes argilosos formam, segundo estes autores, verdadeiros "sistemas", que têm uma individualidade própria e cujas propriedades de conjunto decorrem essencialmente das possibilidades de "interação" entre as diferentes fases. Assim, qualquer modificação da proporção, da natureza e do estado das fases presentes tem uma influência sobre o arranjo das partículas e se traduz por uma alteração das características globais do sistema.

No caso dos Latossolos (solos ferralíticos ou "oxisols"), observações em microscopia eletrônica de transmissão e varredura têm revelado que as caulinitas, argilo-mineral predominante na fração argila, são pobremente cristalizadas, pseudo-hexagonais, de tamanho muito reduzido e não se encontram como cristalitos isolados (PEDRO, 1980 e 1987; TESSIER, 1980; SANTOS et al, 1989), como geralmente ocorre para esses argilo-minerais puros, mas sim como partículas policristalinas. De acordo com a descrição de CAMBIER (1986), essas partículas são formadas por alguns cristalitos dispostos paralelamente e ligados uns aos outros por intermédio de pontes de Fe. As partículas policristalinas se justapõem e formam os microdomínios orientados (1 μm), e

estes compõem os micronódulos que podem atingir até 100µm de diâmetro (TESSIER, 1980; BRESSON, 1981; PEDRO, 1987).

O ferro desempenha, assim, um papel fundamental nesta organização (micronódulos ou micro-peds), mantendo uma parte da argila inibida e relativamente estável no interior dessas partículas mais grosseiras, comumente denominadas de pseudo-siltos, pseudo-areias ou pseudo-partículas (CHAUVEL et al 1976), fazendo com que os solos, apesar do teor elevado em argila, não revelem uma textura argilosa.

A presença do ferro, de acordo com CHAUVEL et al (1976), parece poder modificar certas características das argilas e, em particular, aquelas ligadas à sua reatividade e ao seu comportamento. Entretanto, os autores advertem sobre a necessidade de se fazer uma distinção entre a quantidade de ferro presente em uma amostra e o estado no qual se encontra esse elemento: o que não afeta a constituição da unidade morfológica não modifica fundamentalmente o comportamento dos materiais argilosos; em contrapartida, tudo o que contribui para mudar a unidade morfológica e as propriedades de superfície das partículas, modifica o comportamento do material.

No solo analisado por CHAUVEL et al (op. cit.), observou-se que:

- uma parcela da fração argila (do horizonte B), aproximadamente a metade, se apresenta sob a forma livre, isto é, se dispersa em condições normais, contendo 10,4% de Fe_2O_3 ;
- a outra parcela, considerada como "bloqueada", contém 11,9% de Fe_2O_3 . É essa argila que se encontra nos micronódulos característicos desse tipo de solo;
- extraindo 0,3% de Fe_2O_3 desta última fração, obtém-se uma argila que ainda contém 11,6% de Fe_2O_3 , mas que não está mais "bloqueada", comporta-se como argila livre, sendo, portanto, mais sensível às variações hídricas (fenômenos de expansão e contração mais intensos).

Apenas 0,3% do ferro contido na amostra desempenha um papel ativo nos fenômenos de comportamento, os outros 11,6% provavelmente se individualizam sob a forma de hidrato férrico, podendo ser considerados como inativos deste ponto de vista. A modificação do comportamento resulta, segundo os autores, de uma ação específica dos íons ferríferos; eles se fixam nas bordas, originam as associações borda-face e

provocam a individualização de uma organização isotrópica e porosa. Esse mecanismo não impede que os hidratos férricos se depositem sobre as faces basais ou se precipitem independentemente, mas não são essas formas que desempenham o papel principal.

A organização micronodular dos Latossolos condiciona uma porosidade importante e caracteristicamente bimodal em termos de distribuição por tamanho dos poros:

- macroporos, em geral interagregados, resultantes do empacotamento dos micronódulos e da atividade biológica (porosidade estrutural). É por essa porosidade que circula a água gravitacional e o ar;
- os microporos que se desenvolvem preferencialmente no interior dos microagregados e são resultantes da aglomeração das partículas argilosas (porosidade textural). SANTOS et al (1989) e BUI et al (1989) observaram, com o auxílio de microscopia eletrônica de transmissão, que as formas mais comuns de associação de partículas em um Latossolo são borda-borda e borda-face, o que leva a uma aglomeração das partículas com formação de poros ultramicroscópicos, interconectados e que podem, assim, permitir a difusão de gás e água no interior dos microagregados. Medidas desses ultramicroporos indicam diâmetros médios da ordem de 40 nm, para um Latossolo da região Nordeste do Brasil, argilo-arenoso (30 a 35% de fração argila), analisado por BUI et al (1989), e tamanhos variando predominantemente entre 10 - 30 nm para um Latossolo Amarelo da Amazônia, argiloso (fração argila >80%), estudado por CHAUVEL et al (1991). BRESSON (1981), chegou a distinguir, no solo vermelho ferralítico de Casamance (o mesmo estudado por CHAUVEL et al, 1976), dois tipos de microporos: os resultantes do empilhamento das partículas e dos microdomínios, com formas triangulares e com tamanhos variando entre 5 e 20 nm; e poros alongados entre duas partículas associadas face-face ou borda-borda, ou no interior dos microdomínios, com tamanhos compreendidos entre 2 e 5 nm.

A organização micronodular é, assim, a responsável pela estrutura estável e a boa permeabilidade que muitos dos solos argilosos (com até 80% de fração argila) tropicais, como os Latossolos analisados neste trabalho, apresentam.

As características relacionadas à natureza mineralógica da fração argila; a forma e grau de associação entre os diferentes constituintes; a organização dos elementos que

compõem o solo em todos os níveis (do macro ao ultramicroscópico), são também fatores que influenciam os processos de estabilização, como aqueles com adição de cal (NÓBREGA, 1988) e cimento.

Capítulo II

ESTABILIZAÇÃO COM ADITIVOS PRINCÍPIOS E MECANISMOS

Quando um solo local não apresenta as qualidades exigidas pelo projeto de engenharia, que em geral são estabilidade volumétrica, resistência, permeabilidade e durabilidade (INGLES & METCALF, 1972), uma das opções é a alteração das suas propriedades. Esta alteração, conhecida como "estabilização de solos", pode ser conseguida com a adição de outros materiais: outro solo com características granulométricas complementares (estabilização granulométrica); substâncias como a cal (solo-cal), cimento (solo-cimento) e betume (solo-betume); e outros produtos químicos de origem orgânica ou inorgânica.

A estabilização de solos produz novos materiais, como o solo-cal, solo-cimento, solo-betume, que resistem aos efeitos do tráfego e das variações climáticas sazonais.

Cada aditivo interage com o solo de uma forma particular, seja através de cimentação, modificação da mineralogia, troca de íons, precipitação, polimerização, etc. O conhecimento do princípio de atuação da substância adicionada, bem como das características do material a ser tratado, são fundamentais para o sucesso da estabilização.

Nos segmentos da pista Santa Mariana - Porto Quebra Canoa, objetos deste estudo, foi empregada a estabilização com cal e cal+cimento, cujos princípios e mecanismos serão abordados a seguir.

A estabilização de solos com adição de cal, em particular de solos tropicais, já foi descrita detalhadamente em NÓBREGA (1988). Neste capítulo será dada, portanto, uma ênfase maior à estabilização com cal+cimento e, em particular, ao aditivo cimento.

1. SOLO-CAL

A estabilização com adição de cal (solo-cal) é uma técnica fundamentada em reações físico-químicas e químicas que se desencadeiam entre a cal (óxido ou hidróxido de cálcio ou cálcio e magnésio) e os constituintes do solo - fração argila - capazes de reduzir a sensibilidade dos materiais à ação da água e aumentar a sua capacidade de suporte. Em função do caráter químico da estabilização, a natureza dos solos e da cal desempenha um papel fundamental no processo, controlando e condicionando essas reações, além de outros fatores "ambientais" - temperatura e umidade.

Quanto ao solo, importam principalmente os seus aspectos mineralógicos e de organização (caracterização pedológica e geoquímica). A mineralogia, a forma sob a qual os constituintes se apresentam (grau de cristalinidade, tamanho, associações) e se organizam nos materiais, são responsáveis pelo seu comportamento hídrico-mecânico e pela reatividade com a cal (NÓBREGA, 1988).

Quanto à cal, praticamente todos os tipos são empregados nos trabalhos de estabilização: a hidratada cálcica - Ca(OH)_2 , a dolomítica - $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$ ou $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{Mg(OH)}_2$ - e a cal virgem (na forma de óxido). Na prática, as variações na composição química da cal implicam alterações no teor de umidade ótima de compactação, nas porcentagens de cal adequadas à estabilização, no tempo de cura, na natureza e quantidade dos produtos neoformados e, conseqüentemente, na resistência.

De um modo geral a bibliografia considera que as alterações promovidas pela adição de cal nos comportamentos hídrico e mecânico dos materiais são resultantes de dois tipos distintos de ação da cal:

- uma ação imediata que promove, após alguns instantes (minutos) de contato, mudanças nas propriedades físicas (Limites de Atterberg), como a redução da plasticidade, expansão e alteração nas condições de compactação (aumento do teor ótimo de umidade para se conseguir a densidade máxima e diminuição desta em relação ao material não tratado) e aumento da capacidade de suporte. Essas modificações favorecem também as

condições de trabalho do material. Este se torna mais "granular", diminui sua aderência aos equipamentos e há um alargamento da faixa de teores de umidade possíveis de serem trabalhados (achatamento da curva de compactação);

- uma ação a longo prazo que possibilita, com o decorrer do tempo, um aumento crescente da capacidade de suporte.

Em geral, citam-se os fenômenos de troca catiônica, floculação e aglomeração das argilas como responsáveis pela ação imediata da cal e as reações pozolânicas pela ação a longo prazo, mas pouco se sabe, de fato, sobre os mecanismos envolvidos.

- Ação imediata

Segundo FOSSBERG & GREG (1963), quando a cal é adicionada ao solo o fenômeno de troca de bases ocorre com os minerais de argila. Essa reação leva à floculação das partículas argilosas causando o aumento no ângulo de atrito da massa do solo. Isto se manifesta pelo decréscimo no Limite de Liquidez (LL) e no Índice de Plasticidade (IP) e, freqüentemente, no aumento da umidade ótima. Ainda segundo os autores, a redução do LL e do IP, com adição de cal ou cimento, é provocada pela diminuição da espessura das camadas de água adsorvidas devido à troca de bases.

Essas explicações, repetidas por vários outros autores, não esclarecem, contudo, inúmeras situações observadas com solos naturalmente saturados de cálcio e que, ainda assim, apresentam redução de plasticidade com adição de cal (GOLBERG & KLEIN, 1952 e DIAMOND & KINTER, 1965).

NÓBREGA (1988) analisando dados sobre a variação dos Limites de Atterberg em função dos teores de cal aplicados, apresentados nos trabalhos de LE ROUX (1969) e CASTRO (1969), constatou que para a maioria dos solos analisados seria suficiente menos de 1% de cal para saturar a CTC (Capacidade de Troca Catiônica) de cálcio, excetuando-se aqueles montmoriloníticos que, neste caso, seria ainda inferior a 3%.

Entretanto, esses valores são insuficientes para se conseguir uma modificação considerada satisfatória nas características dos índices. Nos materiais considerados, as alterações significativas só foram atingidas com 7% de cal e, num caso determinado, entre 5 e 7%. Isto significa que os fenômenos ligados à capacidade de troca catiônica (CTC) dos materiais, tal como tem sido colocada, não podem responder isoladamente pela alteração dos comportamentos hídrico e mecânico nos níveis desejados pela engenharia.

Por outro lado, NÓBREGA (1988) observou que existe uma relação estreita entre a mineralogia predominante da fração argila com a intensidade e sentido (aumento ou diminuição) das mudanças no LL: materiais constituídos por caulinita, illita ou mistura desses, apresentam aumentos no LL; as amostras compostas por esmectitas e haloisita apresentam diminuição forte do LL. Os fatos sugerem, portanto, que o mecanismo ou mecanismos aqui envolvidos estão diretamente relacionados às características e propriedades dos materiais argilosos como um todo e dos argilo-minerais em particular. A adição de cal (= adição maciça de íon cálcio) às esmectitas é capaz de promover um fechamento da rede tridimensional característica pelo espessamento e reagrupamento dos tactóides e, assim, diminuir a superfície específica (BANIN & LAHAV, 1968; TESSIER, 1980 e 1984) do material e, conseqüentemente, o teor de água necessário para atingir o LL.

Os materiais cauliniticos e ilíticos, ao contrário, como não têm a sua organização modificada no mesmo nível das esmectitas (LIETARD, 1977 e PEDRO, 1980), acabam tendo um aumento no LL, provavelmente devido à adição de cal, que significa também uma adição de material fino com uma superfície específica grande e capaz de absorver água. Entretanto, deve-se reconhecer que essa adição muda as características de superfície dessas partículas e as suas relações com a água, bem como as próprias características da água, tendo em vista a alta concentração eletrolítica. Trabalhos como os de OLSON & MITRONOVAS (1962), ROSENQVIST (1962), AYLMOORE & QUIRK (1962), WARKENTIN & YONG (1962), OLPHEN (1963), GILLOT (1968), GREENLAND & MOTT (1978) e BOLT (1978) mostram que a natureza física da água na proximidade da superfície do mineral, a quantidade e a composição das soluções presentes

condicionam o grau de agregação e cimentação dos minerais, o seu arranjo (organização das partículas) e as interações mecânica, física e química dos minerais entre si que, por sua vez, condicionam a resistência e as propriedades reológicas das argilas.

- Ação a longo prazo

A ação da cal a longo prazo está fundamentada no caráter pozolânico dos materiais estabilizados. Segundo MILLET et al. (1976), um material com caráter pozolânico é aquele que em combinação com a cal e em presença de água, sob condições de temperatura ambiente, produz compostos hidratados estáveis com propriedades ligantes.

Os solos, apesar de não se constituírem em pozolanas propriamente ditas¹, podem apresentar uma fração argila com caráter pozolânico mais ou menos acentuado, dependendo da sua natureza mineralógica e textural (influência da superfície específica). A fração argila pode ser constituída por argilo-minerais expansivos ou não, com diferentes graus de cristalinidade, produtos amorfos de sílica e alumina, enfim, por elementos capazes de reagir com a cal, de forma lenta ou rápida, e dar origem aos mesmos produtos cimentantes que as pozolanas reais. Esse caráter pozolânico é, então, o responsável pelo ganho de resistência (característica das pozolanas) com o envelhecimento da mistura.

MILLET et al. (1976) afirmam que, com relação às argilas, o mecanismo que prevalece no tratamento com a cal é aquele de um lento processo de alteração da rede cristalina, que afetaria particularmente as camadas octaédricas aluminosas dos folhetos (observado por espectrometria de infravermelho). Vários autores, entre eles DIAMOND & KINTER (1965) e GOFFEAU (1978), observaram que os aluminatos cálcicos hidratados são os primeiros a se formar e de forma rápida, uma hora após a adição de cal.

¹ São consideradas como pozolanas as argilas calcinadas, produtos amorfos, cinzas volantes e vidros vulcânicos.

Do ponto de vista geoquímico, as reações pozolânicas são reações de dissolução e síntese, resultantes da alteração das condições físico-químicas do meio pela adição de cal. Isto é, quando a cal é adicionada a um material há um aumento instantâneo do pH do meio. O pH, que varia entre 5 e 6,5 para os solos tropicais, chega, com a adição de 5% de cal cálcica, a valores em torno de 12. Criam-se, assim, condições muito alcalinas e os constituintes do solo compostos por alumina e sílica, antes estáveis nas faixas de pH comuns na natureza, passam a ser instáveis.

Os minerais da fração argila sofrem uma solubilização ao nível da superfície e, dada a grande disponibilidade de cálcio no meio, é possível formar, em combinação com a sílica e a alumina liberadas, aluminatos, silicatos e aluminossilicatos de cálcio hidratados, semelhantes àqueles obtidos pela hidratação do cimento portland, segundo EADES et al. (1962). São principalmente o C-S-H(I)¹, C-S-H(gel), C_4AH_{13} , C_2AH_8 , C_3AH_6 , C_2ASH_n , além de compostos com carbono descritos em TURRIZIANI (1964), TAYLOR (1964) e RAMACHANDRAN (1969).

Nas reações entre a cal e o solo vários são os fatores que influem diretamente no processo de estabilização e nas características dos compostos formados: a temperatura, o tempo e a natureza química e mineralógica dos materiais (do solo e da cal).

Vários autores (GLENN, 1963; WANG, 1966; RUFF & HO, 1966) observaram a ocorrência de minerais de neoformação diferentes, tanto em função do tempo de cura como da temperatura, para misturas semelhantes:

- GLENN (1963) em uma mistura bentonita/cal, curada à temperatura ambiente por longo período, identificou C_4AH_{13} , C-S-H(I), C-S-H(gel) e provavelmente C-S-H(II). A mesma mistura curada a temperaturas mais altas, em período curto, produziu C-S-H(gel), C-S-H(I) e C_4AH_{13} a 40°C, e C-S-H(I) e provavelmente C-S-H(II) ou tobermorita aluminosa a 80°C;
- RUFF & HO (1966) também observaram variações semelhantes nos produtos neoformados, em uma mistura de bentonita/cal, em relação a tempo e temperatura.

¹Na química do cimento a referência aos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados se faz utilizando a forma abreviada dos compostos:
C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃ e H = H₂O

Verificaram ainda que essas variações são acompanhadas, em termos mecânicos, por mudanças no ganho de capacidade de suporte. Sugerem, portanto, que o ganho de resistência das misturas argila/cal é devido às diferentes fases do complexo de reação;

- estudos feitos por PERRET (1977 e 1979), ESTÉOULE & PERRET (1979) mostram claramente essa relação estreita entre o ganho de resistência/tempo/temperatura/consumo de cal (Figs. 2 e 3).

A temperatura, além de acelerar o processo de estabilização, influi, provavelmente, na sua natureza: RUFF & HO (1966) suspeitam da possibilidade de substituições na estrutura dos silicatos de cálcio hidratados acima de 50°C; já ESTÉOULE & PERRET (1979) afirmam que os mesmos processos químicos se produzem no decorrer de uma fase de estabilização qualquer que seja a temperatura. Da mesma forma devem ser consideradas também as condições de umidade na preparação e cura da mistura, principalmente no caso dos aluminatos que resultam em compostos mais ou menos hidratados, associados ou não a carbonatos (MILLET & HOMNEY, 1974; SABRY et al., 1981).

A natureza dos materiais (mineralogia e textura do solo, composição química da cal), por sua vez, influencia o processo de estabilização quanto à qualidade e quantidade dos produtos neoformados - predominância de silicatos ou aluminatos de cálcio hidratados.

PERRET (1977) mostra que para uma composição mineralógica (solo) semelhante, a estabilização se encontra favorecida do ponto de vista mecânico por um aumento da superfície específica. Quando a composição mineralógica varia (essencialmente aquela da fração argila, a intensidade dos fenômenos de estabilização muda de maneira radical, mesmo para texturas análogas.

Aparecem ainda como fatores que condicionam a estabilização solo-cal o grau de cristalinidade dos minerais, substâncias associadas que podem interferir nas reações com a cal acelerando ou retardando o processo (NÓBREGA, 1988), e o teor de água existente no sistema, que vai influenciar o grau de hidratação dos compostos aluminatos.

MATERIAL	ARGILA (%)	MINERALOGIA
A	24,1	Caulinita e vermiculita
C	7,4	Caulinita e vermiculita
K	10,8	Caulinita
S	Superfície específica em m ²	

Fig. 02: Variação do consumo de cal (Cc%) em função do tempo e segundo a natureza do material: a) cura a 20°C; b) cura a 60°C (PERRET, 1977)

Fig. 03: Variação da resistência à compressão simples (Rc) em função do tempo e segundo a natureza do material: a) cura a 20°C; b) cura a 60°C (PERRET, 1977).

Outros fatores igualmente importantes a serem destacados e geralmente não mencionados pelos autores são a natureza química da cal e a sua qualidade que, da mesma forma que os materiais, são capazes de influenciar todo o processo e os resultados finais.

Assim, é a natureza química da cal que vai condicionar a quantidade do íon cálcio presente, enquanto que a qualidade (responsável também pelas características ligadas à reatividade e à granulometria) interfere diretamente na sua disponibilidade para as reações.

É importante lembrar que todas essas influências foram verificadas dentro de condições experimentais de laboratório e, portanto, com os fatores sob controle.

2. SOLO-CAL-CIMENTO

Alguns materiais têm as suas propriedades modificadas pela adição de cal mas não apresentam ganho de resistência suficiente para permitir o seu emprego como bases de pavimentos. Nesses casos, pequenas porcentagens de cimento portland adicionadas podem aumentar a capacidade de suporte e torná-los aptos ao uso. Em outra situação, os solos são plásticos e apenas a adição de cimento não corrige as propriedades relacionadas à plasticidade; muitas vezes, é impossível obter-se uma mistura eficiente do cimento com o solo. A cal é, então, utilizada como um pré-tratamento para a estabilização com o cimento.

Geralmente, na adição conjunta de cal e cimento, cabe à cal melhorar certas propriedades dos materiais (como por exemplo: a redução do teor de umidade, da plasticidade, da expansão ou contração) para permitir tanto uma mistura eficiente do solo com o cimento como melhores condições de trabalho; ao cimento cabe o desenvolvimento dos produtos ligantes para assegurar um aumento de capacidade de suporte efetiva.

HÉRAUD et al (1975) relatam a aplicação desta técnica para a estabilização de arenas graníticas na França. Segundo os autores, esses materiais, que possuem uma fase argilosa importante (resultante da alteração dos feldspatos) embalando grãos de quartzo e de outros minerais pouco alterados, apresentam uma particularidade geotécnica principal: perdem toda a capacidade de suporte após o aumento (de alguns pontos) de umidade. O CBR pode passar de 20% a 3% quando a umidade aumenta de 11% para 13%. A adição de 2% de cal e 3% de cimento portland se mostrou eficiente para a estabilização da maioria das arenas pesquisadas. Ocorreu a diminuição da sensibilidade do material face à água e aumento de capacidade de suporte permitindo a sua utilização na construção de camadas de base de pavimentos.

A estabilização solo-cal-cimento, segundo PUIATTI et al (1983), é recomendada para os solos medianamente ou pouco argilosos.

Para se entender a estabilização solo-cal-cimento é necessário, em primeiro lugar, saber o que é o cimento e qual o seu princípio de reação para, depois, compreender os mecanismos desencadeados quando da sua mistura com os solos e com a cal.

2.1. Cimento

O cimento portland é constituído por um número de componentes minerais anidros cuja reação com a água provoca a hidratação e o seu endurecimento. Pertence ao grupo dos aglomerantes hidráulicos, enquanto que a cal pertence ao grupo dos aglomerantes aéreos.

É produzido a partir da calcinação, a no máximo 1450°C, de uma mistura de determinadas quantidades de calcário e argila e, quando necessário, de corretivos silicosos, aluminosos ou ferríferos, para garantir a composição química dentro de limites

específicos. O material sinterizado e peletizado resultante é o clínquer de cimento portland.

Do ponto de vista químico é constituído principalmente por CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e outros óxidos. Os teores, para cada elemento, podem variar dentro dos seguintes limites (LEA, 1970):

CaO	-	60,0 - 67,0%
SiO_2	-	17,0 - 25,0%
Al_2O_3	-	3,0 - 8,0%
Fe_2O_3	-	0,5 - 6,0%
MgO	-	0,1 - 5,5%
$\text{NaO} + \text{K}_2\text{O}$	-	0,5 - 1,3%
SO_3	-	1,0 - 3,0%

A elevação gradual da temperatura durante a queima desencadeia uma sequência de reações envolvendo esses constituintes químicos e originando, ao final, uma mineralogia específica do clínquer de cimento portland: silicato tricálcico (alita), silicato bicálcico (belita), aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico. Na Tabela 1, são apresentados esses compostos e a suas composições químicas básicas.

Tabela 1: Principais compostos do clínquer do cimento portland

NOME	FÓRMULA	COMPOSIÇÃO (%)			
		CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
Silicato tricálcico (C_3S)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	73,7	26,3	-	-
Silicato dicálcico (C_2S)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	65,1	34,9	-	-
Aluminato tricálcico (C_3A)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	62,3	-	37,7	-
Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	46,1	-	21,0	32,9

Fonte: CZERNIN, 1963

Segundo KIHARA et al. (1990), as quatro fases principais (alita, belita, C_3A e C_4AF) se caracterizam, na realidade, por composições bastante variadas, nas quais os elementos menores (Al, Mg, Fe, Na, K, Cr, Ti, Mn, P, etc.) levam à formação de verdadeiras soluções sólidas. São o resultado de influências tanto da constituição química e mineralógica das matérias-primas como das condições de fabricação (finura do cru, temperatura de queima, taxa de aquecimento, condições de resfriamento, etc.) e das próprias reações de difusão entre as fases. Para aumentar ainda mais a complexidade, a cristalização dos compostos nem sempre se dá sob condições de equilíbrio físico-químico, possibilitando a ocorrência de várias transformações polimórficas em algumas dessas fases.

Mudanças relativamente pequenas na composição química do cimento podem significar modificações importantes na sua constituição mineralógica, como pode ser verificado na Tabela 2, elaborada por CZERNIN (1963). Este fato é importante já que as fases mineralógicas do clínquer condicionam o comportamento dos cimentos produzidos.

Tabela 2: Influência da variação química na composição mineralógica do cimento portland.

ÓXIDOS (%)	CIMENTO 1 ¹	CIMENTO 2 ²	CIMENTO 3 ³
SiO ₂	20,0	22,0	20,0
Al ₂ O ₃	7,0	7,7	5,5
Fe ₂ O ₃	3,0	3,3	4,5
CaO	66,0	63,0	66,0
Resíduo	4,0	4,0	4,0
MINERAIS (%)			
C ₃ S	65	33	73
C ₂ S	8	38	2
C ₃ A	14	15	7
C ₄ AF	9	10	14

¹ Cimento de composição média;

² menos CaO - diminuição do C₃S e aumento do C₂S em várias vezes o valor anterior;

³ igual teor de CaO e SiO₂ do primeiro caso, menos Al₂O₃ e mais Fe₂O₃ - grande diferença na relação silicato tricálcico/silicato dicálcico. Diminuição do C₃A, aumento do C₄AF e grande aumento do C₂S.

A alita e a belita são os principais constituintes do clínquer portland e são, também, os principais responsáveis pela evolução da sua resistência mecânica a médio e longo prazo.

No estudo apresentado por KIHARA et al. (1990) estão relacionadas as principais características de constituição e morfologia dos compostos do cimento portland, bem como as suas relações texturais e estruturais e as possíveis variações em função do processo de produção. Com base nesse trabalho, são sumariamente apresentadas, a seguir, as características principais dessas fases minerais.

A alita, que representa entre 40% e 70% do clínquer, aparece como solução sólida de C_3S com proporções variadas de elementos menores. Quando o clínquer é produzido adequadamente, os cristais são bem formados e idiomórficos, com formas tabulares e compactos (seções transversais pseudo-hexagonais). Quando prevalecem condições de baixa temperatura ou curta permanência na zona de clínquerização, a cristalização é incompleta e os cristais formados são irregulares e xenomórficos. Já em condições de alta temperatura (fusão parcial do clínquer), os cristais se tornam excessivamente alongados. Condições de resfriamento lento, após a zona de clínquerização, podem desestabilizar os cristais de alita, dando origem a uma corrosão das bordas e precipitação de belita e cal secundária. Esse fenômeno provoca uma redução da hidraulicidade da alita (cristais decompostos) e pode levar à queda de resistência do cimento.

O aumento na quantidade de alita produz maior resistência mecânica do cimento. De acordo com CHATTERJEE (1979), o teor ótimo situa-se próximo a 65%.

A belita, silicato bicálcico impuro, à semelhança da alita, tem na sua composição a participação de elementos menores (Al, Fe, Mg, Na, K, S, P, Ti, etc.) formando também uma solução sólida. Os cristais de belita apresentam formas variadas que refletem as condições do primeiro resfriamento do clínquer: resfriamento normal resulta em forma arredondada; condições lentas produzem forma digitada. A belita apresenta polimorfos, que se formam em função da variação da temperatura durante o resfriamento: à medida que o resfriamento se processa, a forma α (temperatura mais alta) passa para α' ,

estabilizando-se finalmente na forma β . No clínquer de cimento portland a belita está presente na forma β (β -belita) e, ocasionalmente, na forma α' (LEA, 1970).

O material que preenche os espaços entre os cristais de alita e belita do clínquer portland, é denominado "fase intersticial" e é constituído pelos aluminatos e ferro-aluminatos cálcicos. Distinguem-se duas formas cristalinas: o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) e o aluminato tricálcico (C_3A).

O aluminato tricálcio é importante na definição do tempo de pega e nas resistências iniciais dos cimentos. A reatividade do C_3A depende do seu grau de cristalização e da incorporação de elementos menores na sua estrutura. De um modo geral o C_3A melhor cristalizado é mais reativo do que o microcristalino.

Ocorrem no clínquer, de forma mais restrita, outras fases minerais, cuja origem está relacionada com o balanço de álcalis e enxôfre e com a ocorrência de ambiente redutor no forno. Apesar de aparecerem em pequenas porcentagens ($< 1\%$) podem afetar algumas das propriedades do cimento, como o tempo de pega e a evolução das resistências mecânicas; o sulfato de cálcio ($CaSO_4$) é um exemplo disso.

Na Tabela 3, estão reunidos dados sobre as características físicas e químicas de algumas amostras de cimentos brasileiros, tipo CP-320, apresentadas por PITTA & NASCIMENTO (1981).

Esses minerais anidros quando misturados à água reagem formando compostos hidratados. A reação de hidratação, que se inicia imediatamente após o contato com a água e que depois de algumas horas já confere ao material um certo endurecimento, prossegue por vários dias, meses e até anos. Assim, é o processo de hidratação o responsável pelo desenvolvimento da resistência nas pastas de cimento, argamassas e concretos.

A partir da adição da água, formam-se temporariamente soluções supersaturadas e instáveis que depositam gradualmente seu excesso sólido e tendem a entrar em equilíbrio com os compostos hidratados produzidos (BOGUE, 1952; CZERNIN, 1963;

Tabela 3: Características físicas e químicas de algumas amostras de cimento portland, CP-320 (PITTA & NASCIMENTO, 1981)

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS												
AMOSTRA	FINURA RESÍDUO # 200 (%)	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (g/cm²)	MASSA ESPECÍFICA (g/cm³)	PEGA		EXPANSÃO A QUENTE (mm)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO					
				INÍCIO (h:min)	FIM (h:min)		3 DIAS (kgf/cm²)	7 DIAS (kgf/cm²)	28 DIAS (kgf/cm²)			
	máx. 15,0	mín. 2600		mín. 1:00		máx. 5	mín. 100	mín. 200	mín. 320			
10089	3,0	3510	3,22	3:20	-	0,0	183	244	375			
10636	5,3	3390	3,20	4:00	-	0,0	193	275	402			
10828	5,4	3210	3,20	3:50	-	0,0	154	227	334			
ANÁLISE QUÍMICA												
AMOSTRA	PERDA AO FOGO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	RI (%)	CaO livre (%)	Eq. Alc. (%)
	máx. 4,0					máx. 6,5	máx. 3,5			máx. 1,0		máx. 0,6
10089	2,24	20,67	4,95	3,81	62,74	3,23	1,44	0,11	0,66	0,46	0,76	0,54
10636	2,90	20,63	4,69	3,91	63,00	2,14	1,65	0,09	0,58	0,21	0,39	0,47
10828	3,14	20,21	5,90	3,96	56,18	6,33	1,84	0,32	1,48	1,14	2,46	1,29

LEA, 1970). Os compostos anidros originais não podem existir em equilíbrio com soluções aquosas. O resultado último da ação da água precisa ser a completa hidratação.

Essa reação pode ser mais facilmente entendida tomando-se como exemplo a hidratação do $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$:

À medida que a cal é liberada pela reação ela se deposita como cristais de hidróxido de cálcio. O silicato hidratado resultante permanece estável em contato com a solução saturada em cal (LEA, 1970).

A reação do cimento com a água pode ser considerada, numa primeira instância, como uma reação dos constituintes individuais, mas num segundo momento há uma interreação de parte dos constituintes liberados ou dissolvidos. Segundo os autores anteriormente citados, o C_3A e as fases ferrita reagem em primeiro lugar, rapidamente, o mesmo acontecendo com o C_3S , mas o $\beta\text{-C}_2\text{S}$ reage com a água mais lentamente. O hidróxido de cálcio liberado na hidratação dos silicatos participa das reações de hidratação dos aluminatos e dos ferroaluminatos de cálcio. O gipso (CaSO_4 , adicionado ao cimento para retardar a "pega") também se dissolve de imediato e os compostos de alumina se cristalizam como aluminatos de cálcio hidratado e/ou sulfoaluminatos. Na Tabela 4 estão relacionadas as principais reações (simplificadas) de hidratação dos compostos do cimento portland.

Segundo LEA (1970), provavelmente atuem dois mecanismos na hidratação do cimento:

- solução verdadeira - os compostos se dissolvem e produzem íons em solução e estes se combinam e precipitam como produtos hidratados;
- reação no estado sólido - reação topoquímica direta, os componentes não passam para a solução.

Tabela 4: Hidratação dos compostos do cimento.

$2(3\text{CaO}.\text{SiO}_2)$ (C_3S)	+ $5,5\text{H}_2\text{O}$	= $3\text{CaO}.\text{SiO}_2.2,5\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$ (C-S-H) (Portlandita)
$2(2\text{CaO}.\text{SiO}_2)$ ($\beta\text{-C}_2\text{S}$)	+ $3,5\text{H}_2\text{O}$	= $3\text{CaO}.\text{SiO}_2.2,5\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ (C-S-H) (Portlandita)
$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)	+ $10\text{H}_2\text{O} + 2\text{Ca}(\text{OH})_2$	= $6\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3.12\text{H}_2\text{O}$ (Ferroaluminato de cálcio hidratado)
$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)	+ $12\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$	= $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.13\text{H}_2\text{O}$ (C_4AH_{13})
$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)	+ $10\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$ (Gipso)	= $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaSO}_4.12\text{H}_2\text{O}$ (Monossulfoaluminato de cálcio)

A reação em solução verdadeira deve ocorrer nos primeiros estágios e a solução sólida, nos últimos. Considerando as várias fases envolvidas no processo, o autor apresenta (Fig. 4) um esquema para a hidratação do cimento portland.

Durante a reação dos silicatos cálcicos (C_2S ou C_3S) com a água, o hidróxido de cálcio é expelido e silicatos de cálcio hidratados, pobremente cristalizados ou na forma de gel, são formados. Esses produtos, genericamente designados como C-S-H, representam entre 50% e 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento portland completamente hidratada, apresentam superfície específica entre 100 e 700 m²/g, e são os principais responsáveis pelas propriedades da pasta (MEHTA, 1986). O grau de cristalinidade e a composição do C-S-H pode variar, chegando a apresentar semelhanças estruturais com fases cristalinas. Tem sido relatada a ocorrência de duas variedades de silicatos cálcicos hidratados, identificados como C-S-H(I) e C-S-H(II), formados em condição ambiente. O C-S-H(I) relaciona-se do ponto de vista estrutural à tobermorita ($\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_9$), por isso é também chamado tobermorita gel, e apresenta razão Ca/Si variando entre 0,8 e 1,5 (TAYLOR, 1964); o C-S-H(II) apresenta razão Ca/Si entre 1,5 e 2,0, ou superior, e é estruturalmente relacionado, de acordo com TAYLOR (1986), com a jenita ($\text{C}_9\text{S}_6\text{H}_{11}$).

O C-S-H apresenta morfologia variada, aparecendo como fibras mal cristalizadas ou se apresentando com um padrão reticular. Apresenta dimensões

HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Fig. 04: Representação esquemática da hidratação do cimento portland à temperatura ambiente (LEA, 1970).

coloidais e tendência a ocorrer como assembléias cristalinas (agregados). A resistência do material é atribuída principalmente às forças de van der Waals (MEHTA, 1986).

Os cristais de hidróxido de cálcio (portlandita), $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formados durante o processo de hidratação do cimento, constituem, segundo MEHTA (op. cit.), entre 20% e 25% do volume sólido da pasta. Formam geralmente grandes cristais prismáticos hexagonais, cuja morfologia varia de indefinível a pacotes de placas, sendo afetada pelo espaço disponível, temperatura de hidratação e impurezas presentes no sistema.

A hidratação do aluminato tricálcico produz o aluminato tetracálcico hidratado hexagonal - C_4AH_{13} - que, em reação com o gipso, forma os sulfoaluminatos: de início o trissulfoaluminato $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$, ou ettringita, que se transforma em seguida em monossulfoaluminato $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ e em solução sólida C_4AH_{13} - monossulfoaluminato.

A ettringita se apresenta como cristais prismáticos de secção hexagonal. O monossulfoaluminato, de acordo com REGOURD (1975), só se forma quando todo o SO_3 já foi consumido e aparece em plaquetas hexagonais espessas (1 a 2 μm), enquanto que o C_4AH_{13} aparece em finos cristais, igualmente hexagonais.

Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15% a 20% (MEHTA, 1986) do volume sólido da pasta hidratada e desempenham um papel menor nas relações entre estrutura e propriedades.

O ferroaluminato tetracálcico se hidrata um pouco mais lentamente que o aluminato tricálcico. O produto final da hidratação do C_4AF pode ser uma solução sólida C_3AH_6 - C_3FH_6 e óxido hidratado ou amorfo $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ (LEA, 1970). Em presença de excesso de cal forma-se uma fase hexagonal plana (solução sólida) de compostos $\text{C}_4\text{A} \cdot \text{aq}$. e $\text{C}_4\text{F} \cdot \text{aq}$.

Conforme a teoria de LE CHATELIER (apud REGOURD, 1975), a cristalização espontânea dos hidratos constitui o início da "pega". O entrelaçamento dos hidratos de naturezas diferentes assegura a coesão da pasta de cimento e leva ao endurecimento do material.

REGOURD (1975) resume esse processo: os silicatos de cálcio hidratados (de fórmula geral C-S-H - $C/S < 2$), que se cristalizam nos primeiros instantes em folhas delgadas, se agrupam, em seguida, em fibras. A portlandita - $Ca(OH)_2$ - liberada pela hidratação dos silicatos aparece em cristais hexagonais que se empilham em "agregados" compactos formando pontes entre os grãos parcialmente hidratados. A quantidade de cristais finos aciculares de C-S-H cresce em função do tempo. É o entrelaçamento progressivo dessas fibras que dará ao cimento a resistência a longo termo.

Vários fatores podem interferir na reação do cimento (hidratação), principalmente o teor de água da mistura, a temperatura, o tempo (idade).

2.2. Mecanismos da estabilização com o cimento

Na estabilização de solos o cimento desempenha um papel diferente daquele observado nas pastas, argamassas e concretos. No caso do concreto, por exemplo, a pasta de cimento envolve partículas grosseiras (ou agregado) preenchendo os vazios deixados entre elas, cimentando-as e, assim, formando um material de alta resistência. No solo estabilizado, ao contrário, as partículas individuais de cimento é que são rodeadas pelos grãos do solo, dando ligações muito mais fracas e, conseqüentemente, menor resistência (KÉZDI, 1979).

Vários autores (CROFT, 1967; GILLOT, 1968; INGLES & METCALF, 1972; GIDIGASU, 1976; KÉZDI, 1979, entre outros) chamam a atenção para a interação do cimento com o solo, ressaltando a diferença de ação nos solos granulares e nos coesivos (argilosos). Segundo KÉZDI (op cit):

- nos solos granulares o efeito do cimento é similar àquele observado no concreto. A única diferença é que a pasta do cimento não preenche os vazios; as partículas são apenas cimentadas nos pontos de contato (Fig. 5). Assim uma matriz descontínua é formada. Quanto melhor graduada for a granulometria dos

Fig. 05: Cimentação nos pontos de contato entre os grãos grosseiros (KÉZDI, 1979).

solos, menores serão os vazios, maior o número e mais extensa a superfície de contato interpartículas, mais forte será o efeito de cimentação;

- nos solos coesivos (presença de siltes e argilas), a hidratação do cimento cria fortes ligações entre as várias substâncias minerais e forma uma matriz que envolve eficientemente as partículas de solos não cimentadas. Desenvolve-se, desta maneira, uma estrutura celular, da qual depende a resistência de toda a construção, mesmo que a resistência das partículas de argila dentro da matriz seja muito mais baixa. Além desses "pilares de partículas" da matriz, o cimento reduz, de um lado, a plasticidade e aumenta, de outro, a resistência aos esforços. O efeito químico na superfície diminui a afinidade da argila com a água e, conseqüentemente, a sua capacidade de retenção. Juntamente com o aumento de resistência, esta forma de ação resulta num isolamento dos agregados não estabilizados que, assim, não podem se expandir.

A ação do cimento sobre os materiais está intimamente relacionada ao processo de hidratação do cimento. A reação de hidratação dos silicatos cálcicos (C_3S e C_2S) libera $Ca(OH)_2$, hidróxido de cálcio (= cal) que pode interagir com os argilo-minerais e/ou materiais amorfos do solo, da mesma forma que a cal adicionada na estabilização solo-cal. Os outros produtos resultantes da hidratação do cimento, silicatos e aluminatos de cálcio, vão desempenhar o papel de ligantes entre as partículas granulares ou agregados de partículas finas (argilas), como acontece com outros materiais (concreto e argamassas).

KÉZDI (op cit), apresenta uma hipótese de interação cimento-argila:

...em primeiro lugar devem ser distinguidos os processos primários e os secundários na consolidação das misturas argila-cimento. Os processos primários incluem a hidrólise e a hidratação do cimento, no decorrer dos quais usualmente aparecem os produtos de hidratação e ocorre a elevação do pH da água. O hidróxido de cálcio produzido nesse período pode reagir muito mais fortemente do que a cal ordinária.

A argila é importante nos processos secundários. Os íons cálcio produzidos durante a hidratação do cimento transformam a argila, primeiro em uma argila cálcica, e aumentam a intensidade da floculação, que já foi iniciada pelo aumento total do conteúdo eletrolítico devido à adição do cimento. O hidróxido de cálcio então ataca as partículas de argila e os compostos amorfos. Os silicatos e aluminatos dissolvidos na água dos poros se

misturarão com os íons cálcio, e material cimentante adicional é precipitado. A reação primária produz material suplementar para a continuação dos processos secundários. Durante os processos secundários, uma substância cimentante é formada sobre a superfície das partículas de argila ou na sua vizinhança imediata, originando os grãos floculados de argila que serão soldados nos pontos de contato. Assim, ligações fortes podem ser criadas entre a pasta de cimento hidratado e as partículas de argila.

Desta forma, conclui o autor, no solo-cimento contendo partículas finas de argila, substâncias cimentantes primárias e secundárias são formadas. Os produtos primários promovem a estabilização conferindo altas resistências; diferem daqueles do cimento normal hidratado no concreto ou argamassa somente pelo seu mais baixo teor de cal. Os processos secundários aumentam a resistência e a durabilidade do solo-cimento pela produção de substância cimentante adicional que fortalece as ligações resistentes entre as partículas.

Como foi observado no tocante à estabilização solo-cal, vários fatores influenciam o resultado final das misturas solo-cimento: porcentagem de cimento adicionado, teor de água, tipo de solo, condições de hidratação do cimento (temperatura, umidade, etc.), idade da mistura, técnica de execução da mistura e compactação, técnica e duração da cura.

Tem sido relatada pelos vários autores a ocorrência de trincamento (fissuramento) nas camadas executadas com solo-cimento. O fenômeno, ainda não muito bem esclarecido em termos de influência sobre a resistência e durabilidade dos pavimentos, é em geral atribuído às mudanças volumétricas (não inibidas totalmente pelo cimento) do material, seja por aumento de umidade, variação de temperatura e congelamento (nas regiões temperadas). Segundo INGLES & METCALF (1972), cerca de 20% da contração observada são devidos à hidratação do cimento. Teores elevados de cimento aumentam a contração e, conseqüentemente, o trincamento. O padrão de trincamento varia em função do tipo de material estabilizado: pode formar uma rede com um espaçamento grande entre as fissuras (delimitação em superfície de blocos maiores) ou uma rede mais densa (blocos menores), como em geral ocorre nos solos mais coesivos.

A resistência dos materiais estabilizados com cimento também aumenta com o tempo. Isso ocorre provavelmente em virtude do processo de hidratação do cimento que, para os silicatos dicálcicos, é lento.

Capítulo III

ÁREA DE ESTUDO

PISTA EXPERIMENTAL SANTA MARIANA - PORTO QUEBRA CANOA

Na pesquisa por técnicas de construção de pavimentos de baixo-custo, o Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná, através da Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento, desenvolveu um programa para aprofundar os estudos dos solos e dos produtos de alteração oriundos do basalto (que recobrem aproximadamente 40% da área do Estado), de técnicas de estabilização e de execução de pistas experimentais.

Para a estabilização dos solos argilosos e dos produtos de alteração foram empregadas, principalmente, a adição de cal e de cal+cimento. Estas misturas foram testadas como bases e reforços de bordos de rodovias e em combinação com outros recursos - como a utilização de uma manta de poliéster não tecida, que confina o material, ou a "pedra cravada", para acabamento da parte superior da base - procurando chegar a um dimensionamento de estrutura de pavimento mais econômico, compatível com as características locais e as necessidades impostas pelo tipo de tráfego.

Dentro desse programa de pistas experimentais a estrada que liga Santa Mariana ao Porto Quebra Canoa (rio Paranapanema), designada como PR-518, é uma das mais extensas e oferece, ao longo do seu traçado, um elenco variado de técnicas de estabilização. Assim, dentro das mesmas condições, viabiliza um estudo comparativo, tanto em termos das características estruturais do pavimento quanto do seu desempenho no decorrer do tempo. Razões pelas quais foi escolhida para a realização desta pesquisa.

A estrada PR-518 está localizada na região norte do Estado do Paraná (Fig. 6), tem 29,5 Km de extensão e foi construída em 1987 como pista experimental.

A estrada atravessa áreas de ocorrência de solos argilosos, onde dominam o Latossolo Roxo e a Terra Roxa Estruturada, e, próximo ao Porto Quebra Canoa, registra-se a ocorrência de Latossolo Vermelho-escuro (Fig. 7).

Fig. 06: Mapa de localização da pista experimental Santa Mariana - Porto Quebra Canoa

Fig. 07: Mapa esquemático dos solos da área e arredores da pista Santa Mariana - Porto Quebra Canoa.

É uma rodovia secundária que serve basicamete para o escoamento da safra de grãos e cana-de-açúcar.

1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PISTA EXPERIMENTAL E DOS SEGMENTOS DE ESTUDO

Entre a cidade de Santa Mariana e o Porto Quebra Canoa já havia uma estrada de terra implantada com as seguintes características:

- largura da plataforma de terraplenagem:

- a) do Km 0,0 (Santa Mariana) ao Km 5,78

- em cortes - 10,70m;

- em aterros - 9,30m;

- b) do Km 5,78 ao Porto Quebra Canoa

- em cortes - 9,30m;

- em aterros - 9,30m;

- revestimento primário:

- largura total - 7,50m;

- espessura - 0,15m.

Aproveitando esse traçado já implantado, o DER-PR projetou e construiu uma estrada com uma largura total para plataforma de pavimentação de 8,00m, com pista de 6,60m e faixas laterais de 0,70m cada, no trecho entre Santa Mariana e o distrito de Quinzópolis (Km 15). De Quinzópolis a Panema (Km 24,3) a plataforma de pavimentação foi reduzida para 7m de largura, e de Panema ao Porto Quebra Canoa (Km 29,5) para 6,20m.

O revestimento primário existente foi escarificado, regularizado e compactado, e sobre essa camada foi construída a base do pavimento.

Este pavimento, concebido como pista experimental, apresenta 66 segmentos onde foram utilizados diferentes materiais, misturas e técnicas de estabilização para a construção da base:

- segmentos em cascalho (local) estabilizado com cal+cimento;
- segmentos em cascalho (local) estabilizado com cal;
- segmentos em solo-cal-cimento;
- segmentos em solo-cal-cimento revestidos com manta de poliéster não tecida (Bidim - Vp 75);
- segmentos em solo estabilizado sem mistura com reforço lateral;
- segmentos com macadame hidráulico;
- segmentos com solo estabilizado com Dynacal;
- segmentos com solo-brita (solo argiloso).

No total foram realizados 61 segmentos empregando a estabilização de solos argilosos ou de cascalho (basalto alterado) com adição de cal e cal+cimento, variando o tipo de solo, os teores de aditivos e a composição química da cal. Estes segmentos correspondem a 28,6 quilômetros de extensão de pista.

Foram selecionados para este estudo 5 desses segmentos. A sua identificação, localização, extensão e a composição da base estão listadas na Tabela 5, e a Fig. 08 mostra as secções típicas da base.

Para facilitar a identificação dos materiais durante as análises optou-se por uma nova designação, utilizando-se siglas para informar o tipo de base (SCC, CCC, CC), seguidas pela indicação do solo utilizado na mistura:

- SCC/LR = base de solo/cal/cimento empregando o Latossolo Roxo;
- SCC/LE = base de solo/cal/cimento empregando o Latossolo Vermelho-escuro;
- CCC = base de cascalho de basalto alterado/cal/cimento;
- CC = base de cascalho de basalto alterado/cal.

Tabela 5: Características gerais dos segmentos selecionados para a pesquisa

SEGMENTO		LOCALIZAÇÃO		EXTENSÃO (m)	LARGURA DA PISTA (m)	TIPO DE BASE	MATERIAL	ADITIVOS/ TIPO E TEORES
Número DER	Designação PESQUISA	Km	Estacas					
04	SSC/LR 1	1,8 a 2,7	92 a 138	920	8,00	Solo-cal-cimento	Latossolo roxo	4% de cal cálcica 5% de cimento Portland
08	CCC	3,6 a 4,0	180 a 203	460	8,00	Cascalho-cal-cimento	Basalto alterado	4% de cal cálcica 5% de cimento Portland
10	SSC/LR 2	6,4 a 7,8	353 a 394	820	8,00	Solo-cal-cimento	Latossolo roxo	4% de cal dolomítica 5% de cimento Portland
41	CC	22,9 a 23,1	1143+5 a 1155	235	7,00	Cascalho-cal	Basalto alterado	5% de cal dolomítica
55	SCC/LE	26,2 a 26,5	1310 a 1325	300	6,20	Solo-cal-cimento	Latossolo vermelho escuro	2% de cal cálcica 3% de cimento Portland

SEGMENTOS COM BASE SOLO-CAL-CIMENTO

- 1 - REGULARIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO A 100% PN (EXECUTADA QUANDO DA CONSTRUÇÃO DO REVESTIMENTO PRIMÁRIO)
- 2 - ESCARIFICAÇÃO, REGULARIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DO REVESTIMENTO PRIMÁRIO EXISTENTE (100% PN)
- 3 - SOLO-CAL-CIMENTO (100% PI)
- 4 - IMPRIMAÇÃO IMPERMEABILIZANTE COM EMULSÃO RECORTADA COM 50% DE ÁGUA ($T = 1,2 \text{ L/M}^2$)
- 5 - TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO COM CAPA SELANTE (1 - 3)

SGMENTOS EM CASCALHO ESTABILIZADO COM CAL E/OU CAL E CIMENTO

A - CASCALHO-CAL

- 1 - REGULARIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DO SUBLEITO A 100% PN (EXECUTADA QUANDO DA CONSTRUÇÃO DO REVESTIMENTO PRIMÁRIO)
- 2 - CASCALHO-CAL (100% PN)
- 3 - IMPRIMAÇÃO IMPERMEABILIZANTE COM EMULSÃO RECORTADA COM 50% DE ÁGUA ($T = 1,2 \text{ L/M}^2$)
- 4 - TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO COM CAPA SELANTE (1 - 3)

B - CASCALHO-CAL-CIMENTO

- 1 - REGULARIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DO SUBLEITO A 100% PN (EXECUTADA QUANDO DA CONSTRUÇÃO DO REVESTIMENTO PRIMÁRIO)
- 2 - CASCALHO-CAL-CIMENTO (100% PN)
- 3 - IMPRIMAÇÃO IMPERMEABILIZANTE COM EMULSÃO RECORTADA COM 50% DE ÁGUA ($T = 1,2 \text{ L/M}^2$)
- 4 - TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO COM CAPA SELANTE (1 - 3)

Fig. 08: Secções transversais tipo dos segmentos seleccionados (Projeto DER-PR).

2. OS MATERIAIS EMPREGADOS

Nos segmentos selecionados foram empregados como materiais naturais dois tipos de solos, o Latossolo Roxo e o Latossolo Vermelho-escuro, e o "cascalho" de basalto alterado, e como aditivos, o cimento portland comum e dois tipos de cal: cal hidratada cálcica e cal hidratada dolomítica.

- Materiais naturais

O solo utilizado na construção da base dos segmentos SCC/LR 1 e SCC/LR 2 provém da jazida 2 (ou J-2) situada no Km 15 da própria estrada, próxima ao distrito de Quinzópolis. Trata-se de um Latossolo Roxo que, nessa caixa de empréstimo, foi explorado até aproximadamente 4,30 m de profundidade.

O Latossolo Roxo (LR), ou Terra Roxa Legítima, e a Terra Roxa Estruturada ocorrem associados sobre os derrames de rochas básicas da Bacia Sedimentar do Paraná. Estão presentes nos Estados de Minas Gerais (ao Sul), Mato Grosso do Sul, São Paulo e no Paraná, recobrimdo a maior parte do III Planalto Paranaense.

Esses solos, derivados da mesma rocha-mãe (basalto), aparecem lado a lado na paisagem (como pode ser observado no mapa da Fig. 07) e têm características comuns, permitindo que na concepção de solos da engenharia e nos seus sistemas de classificação sejam considerados semelhantes. Mas, apesar da semelhança de cor, textura e mineralogia, apresentam comportamentos hídrico e mecânico diferenciados e, em especial, reatividades diferentes face a aditivos como a cal (NÓBREGA, 1988).

O Latossolo Roxo é um solo profundo (5 m em média), bem drenado, argiloso e de cor arroxeada. É homogêneo no perfil, não apresenta grandes variações morfológicas entre os horizontes, cujas transições ocorrem de forma gradual ou difusa.

Do ponto de vista morfológico, segundo a COMISSÃO DE SOLOS (BRASIL, 1960), caracteriza-se por apresentar: pequena variação de cor entre os horizontes A e B; textura argilosa tanto no horizonte A como no B; grande dificuldade de identificação dos sub-horizontes; grande estabilidade dos agregados do horizonte A; o grau de coesão que une os pequenos agregados no horizonte B é muito fraco, mesmo em material bastante seco, desfazendo-se os torrões, com facilidade, em material pulverulento, conhecido como "pó de café"; porosidade elevada e abundância de minerais pesados (aspecto de limalha de ferro).

É um solo fortemente dessilicificado (K_i sempre inferior a 2), constituído essencialmente por caulinita associada à gibbsita, muito rico em ferro e com pouco quartzo.

De acordo com PEDRO et al. (1976), MELFI & PEDRO (1977 e 1978), MELFI (1978) e CARVALHO et al. (1981) a caulinita pode corresponder nesses solos a até 40% do total, mas são comuns valores da ordem de 20%. A gibbsita, por sua vez, pode atingir até 30%, ocorrendo também valores entre 15% e 20%. O ferro chega a 25% e é constituído principalmente por hematita, geralmente aluminosa. A goethita é rara e ocorre como traço.

Corresponde na classificação americana (EUA, Soil Survey Staff, 1975) a um "oxisol", a um "ferrasol" na classificação FAO-UNESCO (1971) e a um solo ferralítico na francesa (FRANÇA, C.P.C.S., 1967).

Na jazida 2 o Latossolo Roxo apresenta uma textura argilosa, com teores de fração argila ($<0,002$ mm) que variam no perfil entre 70% e 74%.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica realizados pelo DER-PR nesta jazida e utilizados para o dimensionamento do pavimento.

O Latossolo Vermelho-escuro, proveniente da jazida 3, situada ao longo da estrada, próxima ao Porto Quebra Canoa, foi empregado nos segmentos mais próximos a esta localidade, como no caso de um dos segmentos estudados (SCC/LE).

Tabela 6: Caracterização geotécnica da jazida 2

LIMITES FÍSICOS: LL	51,6%
LP	37,4%
IP	14,2
DENSIDADE REAL	3,023 gf/cm ³
PESO ESPECÍFICO	1,644 gf/cm ³
UMIDADE ÓTIMA	26%
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	4,68 - 4,89 Kg/cm ²
GRANULOMETRIA:	
% passando na peneira 10	99,92%
" " " 40	99,00
" " " 200	98,00
< 0,05 mm	98,00
< 0,005 mm	74,00

O Latossolo Vermelho Escuro (LE) corresponde a solos com horizonte B latossólico. Apresenta desde perfis argilosos a arenosos.

De acordo com a COMISSÃO DE SOLOS (BRASIL, 1960), OLIVEIRA & MENK (1977), OLIVEIRA (1977) e CASTRO (1980), esses solos ocorrem sobre substratos variados, constituídos por argilitos, siltitos, arenitos, folhelhos, rochas do embasamento pré-Cambriano (filitos, ardósias, gnaisses laminados, micaxistos). Essa ocorrência sobre litologias muito variadas, algumas de caráter inteiramente incompatível com a natureza do solo sobreposto (BRASIL, 1962), é uma constante nesse tipo de solo.

Como o Latossolo Roxo, são solos muito profundos (6 m), evoluídos, de cor vermelho escura e bem drenados, mas que se diferenciam dos primeiros principalmente quanto ao material de origem. Esta diferença se reflete, ao nível do perfil, nos teores de

ferro e de titânio, que são altos no LR e mais baixos no LE (o que indica menor abundância desses elementos no material de origem).

Também apresentam perfis homogêneos, com pequena variação das características morfológicas (sub-horizontes pouco individualizados). A fração argila varia, para os de textura argilosa, entre 40 e 80% e é constituída essencialmente de caulinita, gibbsita e óxidos de ferro. A fração areia é composta por quartzo, concreções ferruginosas e minerais escuros.

OLIVEIRA (1977), estudando vários perfis de LE na região de Campinas (SP), observou que a caulinita é o mineral predominante, perfazendo no horizonte B de 55% a 86%, a gibbsita de 10% a 29%. Constatou ainda a presença de interestratificados clorita-vermiculita.

São solos que apresentam Ki da ordem de 1,0 a 1,75 e são também muito ácidos.

A estrutura do horizonte B é do tipo granular e ocasionalmente poliédrica sub-angular.

Correspondem, a nível de ordem, aos "oxisols" da classificação americana (EUA, Soil Survey Staff, 1975), aos "ferrasols" na classificação FAO-UNESCO (1971) e aos ferralíticos na francesa (FRANÇA, C.P.C.S., 1967).

Na jazida 3 (J-3) o Latossolo Vermelho-escuro apresenta uma textura argilosa com 55% de fração argila e 30% de areia, em média.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados dos ensaios geotécnicos realizados pelo DER-PR.

Em dois segmentos foram empregados cascalho de basalto alterado em mistura com cal (CC) e cal+cimento (CCC). Estas misturas foram designadas pelo DER-PR como "cascalho-cal" e "cascalho-cal-cimento" (especificações DER/PR ES-P 14/91 e 15/91 - PARANÁ, 1991).

Tabela 7: Caracterização geotécnica da jazida 3

LIMITES FÍSICOS: LL	38,4%
LP	26,1%
IP	12,3
DENSIDADE REAL	2,790 gf/cm ³
PESO ESPECÍFICO	1,880 gf/cm ³
UMIDADE ÓTIMA	17,3%
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	4,03 a 4,81 Kg/cm ²
GRANULOMETRIA:	
% passando na peneira 10	99,89%
" " " 40	97,19%
" " " 200	68,97%
< 0,05	63,00%
< 0,005	56,00%

De acordo com as especificações do DER/PR (PARANÁ, 1991), são misturas íntimas, executadas na pista, de "revestimentos primários constituídos de basalto decomposto que, expostos à ação do tráfego e das intempéries, resultaram em uma camada decomposta de agregados graúdos de núcleo resistente e miúdos resultantes da fratura e desgaste daqueles fragmentos maiores, de menor dureza e resistência" com os aditivos (cal ou cal+cimento) e água, adequadamente compactadas e submetidas a processo eficiente de cura.

É relativamente comum em estradas de terra, nessa região (Norte do Paraná), a utilização de cascalho de basalto alterado como revestimento primário, dada a sua abundância e facilidade de exploração. Exige-se (especificação DER/PR ES-T 07/91 - PARANÁ, 1991) que esse cascalho apresente diâmetro máximo de até 4" e tenha núcleo resistente. A estabilização desse material só ocorre após um período de uso, garantindo-

se, assim, a pulverização dos agregados menos resistentes e das camadas mais alteradas que envolvem os núcleos mais preservados. Obtém-se ao final uma matriz de material fino pulverizado que envolve os agregados maiores e mais resistentes.

A experiência em pistas experimentais mostrou que a não observação desta pulverização pode levar, com o uso, a uma transformação da granulometria do material no momento da compactação implicando, este fato, em alteração da umidade ótima e da uniformidade da mistura (problemas na distribuição dos aditivos).

A designação "cascalho de basalto alterado" é, em termos petrológicos, vaga, já que é aplicada para todos os produtos alterados (não interessando o grau ou natureza dessa alteração) de rochas vulcânicas da Bacia Sedimentar do Paraná.

De acordo com os dados obtidos em afloramentos na área da pista experimental e vizinhanças, apresentados por COMIN-CHIARAMONTI (1988), as rochas vulcânicas dominantes são os andesi-basaltos, de textura fracamente porfírica hipocristalina, aparecendo também os de textura porfírica hipocristalina e subafírica holocristalina. Apresentam fenocristais de plagioclásio e microfenocristais de plagioclásio, augita, pigeonita e opacos. A matriz é composta por plagioclásio, vidro, augita, opacos, pigeonita, olivina iddingsitizada e, às vezes, apatita acessória. Na Tabela 8 são apresentados dados sobre a composição química e mineralógica de algumas rochas vulcânicas da região setentrional da Bacia do Paraná, próximo a Santa Mariana, obtidos por COMIN-CHIARAMONTI et al. (1988).

A alteração supérgena, sob condições climáticas tropicais e subtropicais, produz mudanças graduais e profundas que geram níveis diferenciados de alteração a partir da rocha sã e evoluindo até o solo. GONÇALVES (1987) apresenta um perfil esquemático com esses vários níveis de alteração e pedogênese lateríticas sobre rochas básicas, definido na região de Ribeirão Preto (SP) - Fig. 09.

O cascalho de basalto alterado corresponde ao nível da isoalterita: "front" de alteração com início da esfoliação da rocha, quando aparecem fragmentos com núcleo de rocha sã recobertos por córtex amarelos; fácies em bolas, quando o núcleo e o córtex

Tabela 8: Composição química e mineralógica das rochas vulcânicas na área da pista experimental e arredores (Fonte: COMIN-CHIARAMONTI et al, 1988).

PONTO/ AMOSTRA	186 B183	187 B182	200 B185	201 B184
SiO ₂	49.99	50.30	49.71	53.18
TiO ₂	2.91	2.83	2.82	2.15
Al ₂ O ₃	14.12	13.96	13.80	13.11
Fe ₂ O ₃	3.31	4.46	5.71	4.33
FeO	10.45	9.20	8.00	7.20
MnO	0.19	0.21	0.20	0.16
MgO	3.48	3.85	3.97	4.88
CaO	8.70	8.22	8.99	7.81
Na ₂ O	2.90	2.92	2.70	2.93
K ₂ O	1.14	1.23	0.86	1.87
P ₂ O ₅	0.42	0.45	0.41	0.45
P.F.	1.24	1.35	1.95	1.13
Total	98.85	98.98	99.12	99.20
Q	2.97	3.07	3.81	4.23
Or	6.73	7.26	5.08	11.05
Ab	24.54	24.70	22.84	24.79
An	22.14	21.35	22.99	17.09
Di	15.41	13.85	15.88	15.51
Hy	16.41	17.99	17.16	17.70
Mt	2.53	2.49	2.48	2.09
Hm	0.00	0.00	0.00	0.00
Il	5.52	5.37	5.35	4.08
Ap	0.99	1.06	0.97	1.06
Rocha/ tipo	AB	AB	AB	AB
Lat.S	23.109	23.109	23.127	23.127
Long.W	50.388	50.358	50.441	50.402
Alt.	450	430	530	530

LISTA DAS ABREVIACÕES:

Q = Quartzo
Di = Diopsídio
Il = Ilmenita

Or = Ortoclásio
Hy = Hiperstênio
Ap = Apatita

Ab = Albita
Mt = Magnetita

An = Anortita
Hm = Hematita

AB = Andesi-basalto

Lat. = Latitude

Long. = Longitude Alt. = Altitude

		ESTRUTURAIS	MORFOLÓGICAS	FÁCIES DE ALTERAÇÃO E EVOLUÇÃO PEDOLÓGICA					
ESTRUTURAS	ORIGINAIS	SUBSTITUIDAS	Horizontes lateríticos	(Horiz. pedológicos)		ACUMULAÇÕES PEDOLÓGICAS	Glebulares e superiores móveis	Topsequência Terra roxa estruturada Latosolo Roxo (discordância marcada por "stone line")	AFLORENTOS DE CRAYINHOS E BONFIM PAULISTA
				B textural e B latossólico				Latossolo Roxo com acumulações glebulares reliquiais	
				Estruturação fina poliédrica Horiz. muito espesso, móvel pulverulento					
	MODIFICADAS	Endurecido		nível concrecionado avermelhado com "ilhas de couraças amarelas"					
		Reestruturação + pedoturbações fissuração secundária irregular, discordante		"Em grade" argilas mosqueadas fissuras secundárias preenchidas por produtos argilosos e cutâneos escuros					
		Transição		"Intermediárias" alteração e pedoplasmação intensa					
		Dioclastes originais sub-paralelas visíveis; vazios estruturais com disposição poliédrica		Em "bolas" núcleos e córtex da rocha em várias fases de alteração; depósitos de cutâneos escuros nos vazios estruturais					
	PRESERVADAS	Fraturamento prismático secundário. Pequenos blocos empilhados mantêm estrutura original		"front" de alteração supérgena - início de esfoliação da rocha: Núcleos de rocha "sã" + córtex amarelos	PEDREIRA				
		Disjunção colunar prismática vertical-sub-vertical		Rocha-mãe: episódios de atividades hidrotermais através de sistema de vazios primários (fissuras, veios, etc).					

Fig. 09: Esquema sintético dos principais níveis de alteração e pedogênese sobre rochas básicas - perfil laterítico completo - Ribeirão Preto - SP (GONÇALVES, 1987).

da rocha apresentam-se em várias fases de alteração. Os níveis superiores, que correspondem à aloterita onde a alteração e a pedoplasmação são intensas e as estruturas modificadas (neste nível as organizações estruturais herdadas da rocha-mãe são apagadas ou reconhecidas apenas nas manchas reliquiais de isoalteritas, GONÇALVES, op. cit.), não atendem mais às especificações exigidas pelo DER-PR.

Assim, as características dos córtex de alteração que envolvem os fragmentos de rocha (cascalho), e que no decorrer do uso são pulverizados e passam a compor uma matriz mais fina entre os agregados maiores, os núcleos de rocha sã, é que podem interferir diretamente no processo de estabilização com os aditivos.

Segundo GONÇALVES (1987), as rochas basálticas se alteram inicialmente na forma de blocos arredondados (fácies em "bolas"), com córtex de alteração de espessura, cores e densidades variáveis, envolvendo núcleos de rocha quase inalterados. Em geral a espessura do córtex varia de 1 a 5 cm, e a densidade que para o núcleo é de 2,8 decresce até 1,58 no córtex, revelando aumento de porosidade e perda de matéria. Do núcleo para o córtex há uma variação de cores e dureza: a rocha se torna cinza-róseo-ocre-avermelhada e muito friável.

Os dados químicos e mineralógicos apresentandos por GONÇALVES (op cit) evidenciam nos córtex a perda importante de sílica e bases, concentração de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 , com o aparecimento de novas fases mineralógicas amorfas ou cristalinas. O autor relata que à medida que desaparecem os minerais primários, surgem duas fases secundárias principais ligadas à alteração supérgena: os oxi-hidróxidos de ferro (constituídos essencialmente por goethita e fases amorfas) e os plasmas argilo-minerais (compostos de caulinita, gibbsita e amorfos).

- Os aditivos

Em todos os segmentos estabilizados com adição de cal+cimento foi empregado o cimento portland comum, da classe CP-320 - cujas características químicas e físicas foram apresentadas no capítulo II -, fornecido por um único fabricante.

Quanto à cal, houve uma diversidade em termos de composição química e de procedência.

Nos segmentos selecionados para estudo nesta pesquisa, foram empregadas a cal dolomítica e a cal cálcica, cujos dados de composição, fornecidos pelo controle do DER-PR, constam da Tabela 9.

Tabela 9: Composição química das cales empregadas nos segmentos de estudo

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	CAL CÁLCICA (%)	CAL DOLOMÍTICA (%)
Perda ao Fogo	21,70	25,50
Resíduo Insolúvel (em HCl)	6,48	4,80
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	1,86	0,52
CaO Total	60,40	40,40
CaO Solúvel	59,00	27,50
MgO	8,00	26,80
SO_3	0,39	-

Além da distinção na composição química nota-se uma diferença acentuada entre o teor de CaO total e o teor de CaO solúvel nas duas cales. O CaO solúvel é aquele que está disponível para as reações. A redução deste elemento implica, portanto, em perda

de eficiência do aditivo no processo de estabilização. Na cal cálcica a diferença do CaO total para o CaO solúvel é de 1,4%, enquanto que na cal dolomítica esta diferença é de 13%. Isto significa que 13% do CaO presente é inativo indicando que a cal dolomítica empregada apresenta problemas de qualidade o que a torna originalmente menos eficiente.

3. TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO DAS BASES ESTABILIZADAS

A forma de execução dos trechos estabilizados com solo-cal-cimento diferem daquela utilizada nos trechos cascalho-cal e cascalho-cal-cimento.

- Solo-cal-cimento

A técnica de construção obedeceu às seguintes etapas:

- preparação e regularização do subleito;
- transporte e espalhamento do solo (jazida) a ser estabilizado - formação do colchão;
- pulverização do solo até atingir a granulometria indicada para a mistura com os aditivos - 60% do material passando na peneira nº 4 (malha de 4,75 mm de diâmetro de abertura);
- distribuição da cal, em sacos, segundo um padrão de distanciamento para se conseguir a dosagem indicada no projeto. Abertura dos sacos e espalhamento da cal, de início com a motoniveladora (formação de um colchão uniforme) e completado manualmente com rodos;

- pré-mistura da cal ao solo, a seco, com a utilização de grade de discos ou pulvimisturadora;
- em seguida, distribuição do cimento, em sacos, da mesma forma que a empregada para a distribuição da cal, mas com um padrão de distanciamento próprio, tendo em vista a dosagem aplicada; abertura dos sacos e espalhamento na pista;
- mistura, a seco, do cimento ao solo-cal até atingir a homogeneização e o grau de pulverização necessários;
- adição de água à mistura solo-cal-cimento até atingir a umidade ótima de compactação e homogeneização da umidade;
- compactação na energia indicada no projeto. Inicialmente com o rolo pé-de-carneiro e finalização com o rolo de pneus;
- regularização da camada compactada, varrição e rega;
- imprimação;
- observação de um período de cura de 7 dias;
- construção da capa asfáltica.

- Cascalho-cal e cascalho-cal-cimento

No caso dos segmentos de cascalho-cal e cascalho-cal-cimento, a execução prevê a existência de um revestimento primário de cascalho de basalto alterado, que atenda às especificações do DER-PR, sobre um subleito regularizado e compactado a 100% do Proctor Normal e submetido ao tráfego durante um certo tempo.

A construção da pista se inicia com a escarificação e pulverização desse revestimento primário. Ao final dessa etapa é verificada a conformação geométrica da camada e, se necessário, efetuadas correções.

O material a ser tratado deve apresentar teor de umidade igual ou inferior à umidade ótima. Se apresentar excesso de umidade, o revestimento primário deve ser areado, empregando-se a grade de discos e/ou motoniveladora, antes da adição de cal ou cal e cimento.

Obtidas estas condições, faz-se a distribuição da cal, ou cal e cimento, da mesma forma que para as misturas solo-cal-cimento, e a partir daí, sucedem-se as mesmas etapas de construção.

4. CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO DA BASE

Os estudos preliminares que o DER-PR realizou para a determinação de combinações de teores de cal e cimento, testados nos segmentos da pista experimental de Santa Mariana - Quebra Canoa, foram parcialmente apresentados por ARANOVICH & OGURTSOVA (1987). A seleção dos teores foi fundamentada principalmente nos valores de resistência à compressão simples. Na Fig. 10 estão reproduzidas as curvas de variação da resistência em função do teor de cal e cimento, apresentadas pelos autores (op. cit). Verifica-se inicialmente que existe um comportamento diferente entre o LR e o LE, face à resistência, para os mesmos teores de cal e cimento:

- os valores são sistematicamente mais elevados para o LE do que para o LR;
- a adição de cal se mostra mais eficiente no LR do que no LE. No LR os ganhos de resistência são maiores a partir de uma adição de 3% a 4% de cal, para qualquer teor de cimento adicionado. No LE, ao contrário, os ganhos de resistência

Fig. 10: Variação da resistência à compressão simples em função da variação dos teores de cal e cimento (ARANOVICH & OGURTSOVA, 1987).

J2 - Latossolo Roxo

J3 - Latossolo Vermelho Escuro

ocorrem principalmente em função do aumento do teor de cimento. Entretanto, nas misturas com apenas 2% de cimento se evidencia uma participação mais efetiva da cal no ganho de resistência - a adição de 5% de cal dobra o valor da resistência em relação àquela obtida com apenas 2%.

Estes dados levaram à escolha da adição de 4% de cal + 5% de cimento para o LR, tendo em vista que os valores de resistência alcançados por estas misturas cumprem as exigências de projeto. Para o LE optou-se por testar adições menores, 3% de cimento e 2% de cal, considerando-se a situação do segmento - final do trecho -, e tráfego menor.

Com dados fornecidos pelo DER-PR, para uma outra série de ensaios de resistência, construíram-se os gráficos da Fig. 11 onde é possível verificar a evolução da resistência com o tempo de cura para os dois solos: Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-escuro. De um modo geral verifica-se um acréscimo de resistência com o passar do tempo. Observa-se, contudo, que o maior ganho ocorre no período compreendido entre 7 e 28 dias, aumentando de forma mais gradual a partir daí.

4.1. Características físicas, hídricas e mecânicas

Durante a construção da base é realizado, na pista, o controle do grau de pulverização (antes e depois da adição da cal e do cimento), do teor de umidade ótima, da densidade aparente seca, do grau de compactação e de espessura da camada, de acordo com o estipulado no projeto de construção. A determinação da umidade é obtida através do "método expedito da frigideira" e a densidade através do "funil de areia" (PARANÁ, 1991). A seguir apresentamos os resultados desse controle para cada segmento (Tabela 10) e os dados de referência obtidos em laboratório para as misturas e para os materiais compactados sem aditivos.

Fig. 11: Efeito do tempo na evolução da resistência à compressão simples dos solos para diferentes combinações de cal + cimento.

a) misturas com o Latossolo Roxo

b) misturas com o Latossolo Vermelho Escuro

Foram incluídos na Tabela 10 outros índices físicos, estabelecidos a partir de relações entre as diversas fases (partículas sólidas, água, ar) constituintes da base em termos de massas e volumes, foram calculados a partir dos resultados apresentados pelo controle do DER-PR, que ajudam a caracterizar as condições físicas dos materiais e facilitam a comparação entre os segmentos:

- porosidade (n) - é definida pela relação entre o volume de vazios (Vv) e o volume total da amostra (V),

$$n = \frac{V_v}{V} \cdot 100$$

- índice de vazios (e) - definido pela relação entre o volume de vazios (Vv) e o volume de sólidos (Vs),

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

- grau de saturação (Sr) - é a relação entre o volume da água (Vw) e o volume de vazios (Vv),

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100$$

- índice de água (θ) - é a relação entre o volume de água (Vw) e o volume de sólido (Vs),

$$\theta = \frac{V_w}{V_s}$$

Na Tabela 11 estão relacionados os valores médios e os respectivos coeficientes de variação (CV)¹ dos dados obtidos em pista.

A análise das Tabelas 10 e 11 mostra que o teor de umidade ótimo de compactação nas misturas solo-cal-cimento é mais alto e a densidade aparente seca máxima mais baixa do que aquela dos solos originais compactados sem aditivos, mesmo

¹ CV = $\sigma/M \cdot 100$ - σ = desvio padrão; M = média aritmética

Tabela 10: Características físico-hídricas da base ao longo dos segmentos e dos materiais de referência (solos e misturas preparadas em laboratório)

SEGMENTO	ESTACA	Espessura da base (cm)	¹ γ_d	Grau de compactação (%)	Umidade (%)	² n (%)	³ e	⁴ Sr (%)	⁵ θ
LR	-	-	1.644	-	26.0	45.6	0.84	93.9	0.78
SCC/LR 1 (Base de solo/cal cálcica/ cimento - LR)	⁶ P5	-	1.555	100.0	29.0	48.2	0.93	93.5	0.87
	94	15.1	1.488	95.7	28.6	50.4	1.02	84.3	0.86
	96	14.2	1.481	95.2	28.4	50.7	1.03	83.0	0.86
	98	14.8	1.497	96.3	26.5	50.1	1.01	79.1	0.79
	100	15.1	1.412	90.8	28.0	53.0	1.13	74.7	0.84
	102	13.7	1.408	90.5	27.5	53.1	1.13	72.9	0.82
	105	14.6	1.407	90.5	29.8	53.0	1.13	79.2	0.89
	108	15.8	1.457	93.7	27.5	51.4	1.06	77.9	0.82
	110	14.0	1.533	98.6	27.5	48.9	0.96	86.2	0.82
	112	13.2	1.516	97.5	28.7	49.5	0.98	87.8	0.86
	115	11.6	1.594	102.3	28.3	46.9	0.88	96.2	0.85
	117	14.3	1.487	95.7	27.3	50.4	1.02	80.5	0.82
	119	15.8	1.458	93.8	29.2	51.4	1.06	82.7	0.88
	121	14.8	1.533	98.6	26.8	48.9	0.96	84.0	0.80
	124	13.6	1.543	99.2	27.5	48.6	0.95	87.3	0.82
	127	15.4	1.501	96.5	29.3	50.0	1.00	88.0	0.88
	130	13.2	1.483	95.4	28.0	50.6	1.02	82.1	0.84
	133	14.0	1.513	97.3	27.6	49.6	0.98	84.1	0.83
SCC/LR 2 (Base de solo/cal magnesiana/ cimento - LR)	355	13.0	1.544	99.3	27.7	48.6	0.95	87.9	0.83
	358	14.5	1.524	98.0	27.7	49.2	0.97	85.7	0.83
	361	15.0	1.507	96.9	27.7	49.8	0.99	83.9	0.83
	364	13.6	1.557	100.1	28.8	48.1	0.93	93.2	0.86
	367	14.8	1.511	97.2	27.6	49.6	0.98	84.1	0.83
	370	14.3	1.496	96.2	27.0	50.1	1.02	80.6	0.81
	374	14.0	1.536	98.8	29.8	48.8	0.95	93.7	0.89
	377	13.6	1.583	102.0	30.0	47.3	0.90	100.0	0.90
	380	14.5	1.539	99.0	29.8	48.8	0.95	94.0	0.89
	383	15.0	1.448	93.1	29.8	51.8	1.07	83.2	0.89
	386	12.9	1.523	97.9	27.0	49.2	0.97	83.6	0.81
	389	15.0	1.486	95.5	29.8	50.5	1.02	87.6	0.89
LE	-	-	1.880	-	17.3	32.6	0.49	99.4	48.3
SCC/LE (Base de solo/cal cálcica/ cimento - LE)	1311	15.0	1.627	97.1	18.5	41.7	0.72	72.0	0.52
	1314	15.0	1.675	100.0	18.8	40.0	0.67	78.7	0.52
	1317	15.0	1.667	99.0	18.7	40.2	0.68	77.3	0.52
	1320	15.0	1.672	99.8	18.8	40.1	0.67	78.3	0.52
	1323	15.0	1.697	101.0	16.8	39.2	0.64	72.7	0.47
CCC (Base de cascalho/ cal cálcica/ cimento - LR)	⁶ P4	-	1.570	100.0	25.5	44.9	0.81	89.2	0.73
	180	-	1.494	95.1	29.0	47.5	0.90	91.2	0.83
	183	-	1.539	98.0	30.3	46.0	0.85	100.0	0.86
	186	-	1.511	96.2	27.6	47.0	0.87	88.7	0.79
	188	-	1.497	95.3	23.8	47.4	0.90	75.1	0.68
	191	-	1.511	96.2	23.9	47.0	0.87	76.8	0.68
	193	-	1.564	99.6	24.8	45.1	0.82	86.1	0.71
	194	-	1.522	96.9	24.8	46.6	0.87	81.0	0.71
	197	-	1.495	95.2	23.6	47.5	0.91	74.2	0.67
	200	-	1.567	99.8	25.2	45.0	0.82	87.8	0.72
	202	-	1.524	97.1	25.0	46.5	0.87	82.0	0.71
CC (Base de cascalho/cal magnesiana)	⁶ P2	-	1.695	100.0	22.5	40.3	0.68	93.3	0.63
	1144	15.0	1.544	91.1	20.0	45.7	0.84	67.6	0.57
	1147	15.0	1.684	99.3	14.5	40.7	0.69	59.9	0.41
	1150	15.0	1.617	95.4	13.7	43.0	0.76	51.5	0.39
	1153	15.0	1.723	98.6	14.1	39.3	0.65	61.8	0.40

Obs. - Densidade real (γ_s) do LR = 3.023, das misturas solo(LR)-cal-cimento = 3.000 - do LE = 2.790, da mistura solo(LE)-cal-cimento = 2.790

¹Densidade aparente seca - campo ²Porosidade total ³Índice de Vazios ⁴Grau de Saturação ⁵Índice de Água
⁶Material da pista compactado no laboratório.

Tabela 11: Características físico-hídricas da base dos segmentos. Valores médios e coeficiente de variação (CV).

SEGMENTO	SCC/LR 1		SCC/LR 2		SCC/LE		CC		CCC	
	MÉDIA	CV(%)	MÉDIA	CV(%)	MÉDIA	CV(%)	MÉDIA	CV(%)	MÉDIA	CV(%)
ESPESSURA (cm)	14.30	7.3	14.20	5.3	15.00	0.0	15.00	0.0	-	-
DENSIDADE ESPECÍFICA APARENTE (g/cm ³)	1.489	3.3	1.521	2.2	1.668	1.5	1.642	4.1	1.522	1.6
GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)	95.74	3.3	97.83	2.2	99.38	1.3	96.10	3.4	96.94	1.7
UMIDADE (%)	28.02	3.1	28.55	4.1	18.32	4.2	15.57	16.5	25.80	8.6
POROSIDADE (%)	50.38	3.2	49.32	2.3	40.26	2.0	42.17	5.8	46.56	1.9
ÍNDICE DE VAZIOS	1.02	6.9	0.97	4.4	0.68	3.8	0.73	9.9	0.87	3.4
ÍNDICE DE ÁGUA	0.84	3.3	0.85	3.9	0.51	3.9	0.44	16.8	0.74	8.5
GRAU DE SATURAÇÃO (%)	82.94	6.5	88.12	6.3	75.80	3.8	60.20	9.6	84.29	9.1

para energia superior (Proctor Intermediário), empregada nos segmentos SCC/LR 1, SCC/LR 2 e SCC/LE.

Estes dados indicam a manutenção de uma porosidade ainda importante no material compactado. Como pode ser observado nas Tabelas 10 e 11, a base solo-calcimento, nos diferentes segmentos, apresenta uma porosidade média em torno de 50% nas misturas com o LR e de 40% no LE, superior aos solos compactados sem aditivos. As misturas com cascalho CC e CCC, apresentam médias de 42% e 46,5%, respectivamente.

A influência da variação hídrica na densidade aparente seca, comumente observada em laboratório, não se repete em campo como mostram os gráficos (Figs. 12 e 13). Para um mesmo teor, ou teores próximos de umidade, são registrados diferentes

Fig. 12: Variação da densidade aparente seca em relação ao teor ótimo em diferentes pontos ao longo dos segmentos com base de solo-cal-cimento

- a) SCC/LR 1
- b) SCC/LR 2
- c) SCC/LE

1 - Material compactado em laboratório.

Fig. 13: Variação da densidade aparente seca em relação ao teor ótimo em diferentes pontos ao longo dos segmentos com base de cascalho-cal e cascalho-cal-cimento.

a) CC

b) CCC

1 - Material compactado em laboratório.

valores de densidade e, vice-versa: diferentes teores de umidade apresentam valores semelhantes de densidade aparente.

Em todos os segmentos observa-se que o teor de umidade varia, ora acima, ora abaixo do teor ótimo determinado em laboratório. Para as misturas solo-cal-cimento que empregam o LR (SCC/LR 1 e SCC/LR 2 - Fig. 12), oscilam mais freqüentemente entre 0,5% e 1,5% abaixo do ótimo, em alguns setores chega a ser 2,5% menor; as variações acima do teor ótimo são em número menor e não ultrapassam a 1%. Para a mistura solo-cal-cimento empregando o LE, verifica-se uma homogeneidade maior (talvez em virtude do número menor de determinações), apenas em um ponto a umidade é significativamente mais baixa (2%). Neste caso a variação do teor de umidade apresentou uma correspondência maior com a densidade aparente seca.

Para a mistura cascalho-cal-cimento observa-se a mesma tendência verificada para aquelas de solo-cal-cimento, teores freqüentemente mais baixos; entretanto, apresenta alguns pontos com até 5% acima do ótimo. O caso mais discrepante é o apresentado pela mistura cascalho-cal, na qual a partir de um determinado ponto o teor de umidade é 8% a 9% mais baixo (Fig. 13). A maior dispersão dos dados é refletida pelo CV mais elevado neste segmento.

Freqüentemente os dados de densidade aparente seca, obtidos na pista são mais baixos do que aqueles determinados em laboratório, como bem evidencia o grau de compactação (Gc):

$$Gc = \frac{V_d(\text{campo})}{V_{d.\text{max}}(\text{laboratório})} \times 100$$

O grau de compactação, segundo a especificação DER/PR ES-P 12/91 (PARANÁ, 1991), deve ser igual ou superior a 100%, para camadas compactadas na energia normal, e igual ou superior a 97%, para camadas compactadas na energia intermediária. Este valor é calculado estatisticamente (≥ 9 determinações) de acordo com a expressão abaixo:

$$x_{\min} = x - \frac{1,29 s}{\sqrt{N}} - 0,68 s$$

onde:

$$x = \frac{\sum x}{N} \quad s = \sqrt{\frac{\sum (x-x)^2}{N-1}}$$

$$N \geq 9$$

Os segmentos SCC/LR 1 e SCC/LR 2, compactados com energia intermediária, e o CCC, com energia normal, que atendem ao número mínimo de determinações para o cálculo estatístico, apresentam grau de compactação abaixo do exigido:

SCC/LR 1 = 92,5% (mínimo 97%)

SCC/LR 2 = 95,4% (mínimo 97%)

CCC = 95,1% (mínimo 100%).

Apenas o segmento SCC/LE, apesar de não possuir o número de determinações indicado, apresenta grau de compactação aceitável, 97,7%. O segmento CC, ao contrário, apresenta o grau de compactação mais baixo de todos os segmentos estudados (91,1%).

Nos gráficos da Fig. 14 pode-se observar as variações hídrico-físicas, ao longo dos segmentos. A porosidade está representada como Índice de vazios (e) e a umidade como Índice de Água (θ); o distanciamento entre essas duas curvas dá a idéia do grau de saturação. O grau de compactação (G_c) também está representado e mostra a sua relação inversa com o Índice de Vazios.

No segmento SCC/LR 1 verifica-se que as relações entre as fases constituintes do material obtidas em laboratório (P5) não se repetem no campo, mesmo em condições hídricas semelhantes - estacas 119 e 127. Aparecem lado a lado, ao longo do segmento, materiais com características físico-hídricas distintas que se traduzem em propriedades mecânicas também distintas, como mostra o controle da resistência dos materiais estabilizados.

Este controle, realizado com ensaios de CBR (Californian Bearing Ratio), e cujos resultados estão plotados no gráfico da Fig. 15, foi feito apenas neste segmento. Os

Fig. 14: Variação do Índice de Vazios, Índice de Água e Grau de Compactação em diferentes pontos ao longo dos segmentos com base de solo-calcimento:

- a) SCC/LR 1
- b) SCC/LR 2
- c) SCC/LE

valores de capacidade de suporte variam entre 56% e 170%, com CBR médio de 102% ($\sigma = 34,26$) e CV de 34%. Ao longo do trecho esta variação aparece correlacionada ao grau de compactação e, conseqüentemente, ao Índice de Vazios: os valores de CBR mais elevados correspondem aos pontos de maior grau de compactação e aos Índices de Vazios mais baixos (Fig. 16).

Comparando-se os segmentos SCC/LR 1 e SCC/LR 2, Fig. 14, observa-se que, apesar dos mesmos teores de aditivos aplicados (4% de cal + 5% de cimento) e da mesma energia de compactação, a constituição física é muito diferente: a variação hídrica, em termos de Índice de Água, ocorre dentro da mesma faixa de valores (médias de 0,84 e 0,85) nos dois casos entretanto, o mesmo não se repete para o Índice de Vazios que é, no geral, mais elevado no segmento SCC/LR 1 (média de 1,02). Isto se reflete no grau de compactação, que também é globalmente mais baixo. A base SCC/LR 2 se apresenta mais compacta e com grau de saturação mais alto (média de 88% para o SCC/LR 2 e 83% para o SCC/LR 1).

A base no segmento SCC/LE, ao longo dos poucos pontos ensaiados, mantém uma homogeneidade nos Índices de Vazios (média de 0,68) e de Água (média de 0,52). Estes são bem mais reduzidos, se comparados com o das bases anteriores, o mesmo acontecendo com o grau de saturação (média aproximada de 76%).

A base cascalho-cal-cimento (CCC) apresenta, na porção inicial do segmento, Índice de Água mais elevado (mas comparável com aqueles das bases de solo-cal-cimento) do que no restante do segmento. Esta variação importante não afetou, contudo, os Índices de Vazios nem o grau de compactação, apenas o grau de saturação (Fig. 17). A base de cascalho-cal (CC) apresenta também uma variação bem marcada do Índice de Água ao longo do segmento, que oscila entre 0,57 e 0,39 (média = 0,44; CV=16,8%). Aparentemente, em função dos poucos dados disponíveis, o Índice de Vazios foi reduzido, acompanhando essa variação. É, no conjunto, a base com Índices de Água mais baixos e com menor grau de saturação (média de 60%).

Além destas características hídrico-físicas, foi realizado também o controle da espessura da base. Segundo a especificação DER/PR ES-P 12/91 (PARANÁ, 1991), a

Fig. 15: Relação entre os valores de capacidade de suporte (CBR) e o grau de compactação para o segmento SCC/LR 1.

Fig. 16: Variação da capacidade de suporte (CBR) e do Grau de Compactação ao longo do segmento SCC/LR 1.

Fig. 17: Variação do Índice de Vazios, Índice de Água e Grau de Compactação em diferentes pontos ao longo dos segmentos com base de cascalho-cal (a) e cascalho-cal-cimento (b).

espessura média, determinada estatisticamente, não deverá ser inferior à espessura do projeto em mais de 1 cm. Valores individuais de espessuras fora do intervalo de +2 a -1 cm em relação à espessura do projeto, não são tolerados.

A espessura média é calculada pela expressão:

$$u = x - \frac{1,29 s}{\sqrt{N}}$$

onde:

$$x = \frac{\sum x}{N} \quad s = \sqrt{\frac{\sum (x - x)^2}{N - 1}}$$

$N \geq 9$ (número de determinações efetuadas).

De acordo com os dados do controle tecnológico de campo (Tabela 10), as bases dos segmentos SCC/LE e CC, atendem ao requisitado. Entretanto, as bases dos segmentos SCC/LR 1 e SCC/LR 2, apresentam espessuras médias no limite aceitável (14 cm), mas com vários pontos abaixo do previsto.

4.2. Análise do tráfego e do comportamento da pista

O comportamento da pista depende, de um lado, das suas condições estruturais e, de outro, do tipo de solicitação (tráfego) a que a estrada está submetida. O levantamento das condições estruturais tem sido realizado pelo DER-PR através de medidas deflectométricas (viga Benkelman), segundo a especificação DNER-ME-24-78, e avaliação visual do estado da superfície. O tráfego, por sua vez, tem sido caracterizado

em termos de volume e de composição através de contagens efetuadas na época de safra agrícola.

- Volume e composição do tráfego

O DER-PR realizou três campanhas de contagem dos veículos que trafegam pela pista: uma no período de 23 a 25 de julho/91 (Tabela 12); a segunda de 27 a 29 de agosto/91 (Tabela 13); a terceira de 18 a 20 de julho/95 (Tabela 14).

De acordo com os dados obtidos nos três períodos verifica-se que o volume de tráfego diário, ao longo do tempo considerado, se manteve dentro dos valores médios (VDM = 450), mas as características de composição do tráfego foram modificadas significativamente.

Em 1991 predominavam os automóveis e os caminhões leves, correspondendo a cerca de 75% do total, enquanto que os veículos pesados compunham apenas 8%. Em 1995, como mostra o gráfico da Fig. 18, os automóveis e caminhões leves passam a significar 54% do volume de tráfego diário, e os veículos pesados, incluindo-se os reboques (16%) que não foram registrados em 1991, participam com 34%. O tráfego na atualidade é mais "pesado" do que nos primeiros anos de existência da estrada.

Segundo informações verbais de técnicos do DER-PR, esse volume de tráfego pode ser considerado alto tendo em vista as características estruturais e funcionais da pista - estrada vicinal.

Tabela 12: Contagem de veículos realizada no período de 23 a 25 de julho de 1991.

TIPO DE VEÍCULO	DISTRIBUIÇÃO DIÁRIA DE VEÍCULOS CARREGADOS					DISTRIBUIÇÃO DIÁRIA DE VEÍCULOS VAZIOS					TOTAL GERAL	VDM
	CONTAGEM DIÁRIA			TOTAL parcial	VDM parcial	CONTAGEM DIÁRIA			TOTAL parcial	VDM parcial		
	Terça	Quarta	Quinta			Terça	Quarta	Quinta				
AUTOMÓVEL	-	-	-	-	-	242	191	208	641	214	641	214
ÔNIBUS	-	-	-	-	-	6	7	7	20	7	20	7
CAM. LEVE	26	32	25	83	28	86	76	90	252	84	335	112
CAM. MÉDIO	24	28	28	80	27	27	18	23	68	23	148	49
CAM. PESADO	10	12	13	35	12	11	5	9	25	8	60	20
TOTAL	60	72	66	198	67	372	297	337	1006	336	1204	401

Tabela 13: Contagem de veículos realizada no período de 27 a 29 de agosto de 1991.

TIPO DE VEÍCULO	DISTRIBUIÇÃO DIÁRIA DE VEÍCULOS CARREGADOS					DISTRIBUIÇÃO DIÁRIA DE VEÍCULOS VAZIOS					TOTAL GERAL	VDM
	CONTAGEM DIÁRIA			TOTAL parcial	VDM parcial	CONTAGEM DIÁRIA			TOTAL parcial	VDM parcial		
	Terça	Quarta	Quinta			Terça	Quarta	Quinta				
AUTOMÓVEL	-	-	-	-	-	246	196	198	640	213	640	213
ÔNIBUS	-	-	-	-	-	12	10	10	32	11	32	11
CAM. LEVE	26	23	36	85	28	120	113	100	333	111	418	139
CAM. MÉDIO	29	38	42	109	36	38	53	54	145	48	254	85
CAM. PESADO	34	22	35	89	30	16	21	32	69	23	158	53
TOTAL	89	83	113	283	94	432	393	394	1219	406	1502	500

Tabela 14: Contagem de veículos realizada no período de 18 a 20 de julho de 1995

TIPO DE VEÍCULO	DISTRIBUIÇÃO DIÁRIA DE VEÍCULOS CARREGADOS					DISTRIBUIÇÃO DIÁRIA DE VEÍCULOS VAZIOS					TOTAL GERAL	VDM
	CONTAGEM DIÁRIA			TOTAL parcial	VDM parcial	CONTAGEM DIÁRIA			TOTAL parcial	VDM parcial		
	Terça	Quarta	Quinta			Terça	Quarta	Quinta				
AUTOMÓVEL	-	-	-	-	-	173	182	160	515	172	515	172
ÔNIBUS	-	-	-	-	-	12	13	10	35	12	35	12
CAM. LEVE	9	12	11	32	11	62	69	52	183	61	215	72
CAM. MÉDIO	25	21	31	77	25	14	21	16	51	17	128	42
CAM. PESADO	60	45	40	145	48	51	29	22	102	34	247	82
REBOQUE	47	43	33	123	41	47	26	15	88	29	211	70
TOTAL	94	121	115	377	125	359	340	275	974	325	1351	450

Fig. 18: Volume diário de tráfego - distribuição por tipo de veículo. Contagens realizadas em 3 períodos diferentes.
a) julho/91 b) agosto/91 c) agosto/95

- Condições estruturais

A deflexão é o principal parâmetro utilizado na avaliação das condições estruturais das estradas. Varia, de um modo geral, de acordo com o tráfego e com a estrutura da pista, sem considerar a temperatura e outros fatores climáticos que podem alterá-la (MOTTA, 1981). Ela reflete as condições elásticas do pavimento e é indicativa de problemas estruturais.

A deflexão admissível é um critério ainda bastante discutido em virtude das muitas variáveis que influenciam este valor e não é fácil chegar-se a um padrão único para todos os casos. A maior parte dos critérios se baseiam em cálculo a partir do VDM, que gera o valor N (passagens do eixo padrão de 8,2 tf em 10 anos) do projeto:

- Método DNER PRO - 11-79

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N;$$

- RUIZ (citado em MOTTA, op. cit.)

$$D_{adm_{8,2t}} = (2,20 - 20 \log N) \times 0,82$$

ou $D_{adm} = 70$ - tráfego pesado

50 - tráfego muito pesado.

O DER-PR realizou nos anos de 1990 e 1991 as medidas de deflexão do trecho experimental. Na Tabela 15 estão relacionados os valores médios de deflexão (em 1/100mm) e o coeficiente de variação CV (%).

Os valores de deflexão variam, comparando-se a faixa esquerda e a faixa direita, para um mesmo segmento. Esta variação pode ocorrer em função das diferentes solicitações da pista impostas pelo tráfego. Na pista Santa Mariana - Porto Quebra Canoa, a pista da esquerda é a que serve para o escoamento da produção agrícola da área, por ela trafegando os caminhões carregados, enquanto que pela pista da direita (entrada) circulam principalmente os caminhões vazios. Assim, a faixa esquerda é a mais solicitada.

A média dos valores de deflexão é efetivamente mais alta na faixa esquerda para os segmentos com base de cascalho, em especial para o pavimento com base decascalho-cal. Este segmento apresenta, no conjunto, os valores de deflexão mais

Tabela 15: Valores de deflexão média e coeficiente de variação dos segmentos em dois períodos: 1990 e 1991.

SEGMENTO	1990				1991			
	LADO DIREITO		LADO ESQUERDO		LADO DIREITO		LADO ESQUERDO	
	D	CV (%)	D	CV (%)	D	CV (%)	D	CV (%)
SCC/LR 1	55,11	29,0	52,09	21,3	41,1	25,0		
SCC/LR 2	54,21	27,3	67,52	26,7	55,00	25,6	-	-
SCC/LE	61,42	18,7	43,28	14,8	56,57	19,6	46,85	17,3
CC	74,57	32,9	90,95	23,4	67,42	31,9	76,38	16,6
CCC	59,54	33,9	64,90	38,4 ²	53,6	46,0	50,54	43,4 ³

²Excluindo o valor da deflexão (148) de um ponto → D = 60,95 e CV = 28,8%

³Excluindo o valor da deflexão (134) de um ponto → D = 46,57 e CV = 26,8%.

elevados, bem evidentes na média obtida ($90,95 \times 10^{-2}\text{mm}$). Os valores de deflexão foram, entretanto, significativamente reduzidos de um ano para o outro, como pode ser observado na tabela.

Nos segmentos com base de solo-cal-cimento, apenas o segmento SCC/LR 2, apresenta valores mais altos na faixa esquerda do que na direita; no SCC/LR 1 as médias estão muito próximas e no SCC/LE, a faixa esquerda apresenta deflexão média bem mais baixa que a faixa direita. Nesses segmentos não se registrou um decréscimo nos valores de deflexão, de um período para o outro, tão importante como aquele observado para os segmentos com base de cascalho. Na maior parte do tempo os valores se mantiveram relativamente próximos.

Considerando-se como $70 \times 10^{-2}\text{mm}$ a deflexão máxima admissível (tráfego pesado), embora o tráfego na pista ainda seja constituído principalmente por automóveis e caminhões leves, verifica-se que as médias obtidas atendem a esse valor, com exceção do segmento CC, lado esquerdo. Em todos os segmentos alguns dados pontuais excedem esse limite.

O coeficiente de variação (CV) das deflexões medidas permite, por sua vez, a avaliação da uniformidade estrutural. Segundo MOTTA (1981), o coeficiente de variação = 35% seria o máximo aceitável, quando um controle de qualidade corrente é empregado na construção. Pelos dados da Tabela 15, observa-se que, com exceção da faixa esquerda do segmento CCC, todos os outros apresentam CV aceitáveis.

No segmento CCC apenas em um ponto é registrada uma deflexão muito elevada (superior a 130), acusando aí a existência de um problema estrutural que condena, nesse setor, a base. Excluindo-se esse ponto do cálculo, o coeficiente de variação baixa para 28,8% (1990) e 26,8% (1991), dentro do limite tolerável.

Apesar da deflexão recuperável máxima se constituir em elemento indispensável para a avaliação das condições estruturais, ela sozinha não consegue explicar o comportamento estrutural e o processo de distribuição das cargas no interior do pavimento. A linha elástica das deflexões (deformada elástica), ao contrário, permite

verificar a influência da carga em diversos pontos do pavimento. Assim, a determinação do "raio de curvatura" da linha elástica de deformação e o produto RD, cujos fundamentos teóricos, metodologias e cálculos são apresentados em MOREIRA (1977) e CARNEIRO & SILVA (1981), são elementos de grande ajuda na avaliação de pavimentos flexíveis.

O Rd é o produto do raio de curvatura "R" da deformada elástica do pavimento, pela deflexão máxima "d", no ponto considerado. Na Fig. 19, está representada a linha (deformada) elástica da deflexão e o raio de curvatura.

Nas campanhas de medidas de deflexão de 1990 e 1991 o DER-PR determinou, em alguns segmentos da pista, as bacias de deformação. O raio de curvatura, que permite o cálculo do RD, foi determinado com o emprego da expressão (DNER-ME 24/78):

$$R = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})}$$

onde: R - raio de curvatura em metros;

D_0 - deflexão no ponto de prova (máxima) em 1/100mm;

D_{25} - deflexão a 25cm do ponto de prova, em 1/100mm.

Os valores dos raios de curvatura e produto Rd obtidos nas duas campanhas para os segmentos estudados estão apresentados na Tabela 16. Nela estão relacionados os valores médios dos raios de curvatura e do produto RD, considerando-se todas as medidas realizadas ao longo de todos os segmentos da pista.

De acordo com o DNER-PRO/11/79, valores de $R < 100$ m indicam pavimentos com problemas estruturais e valores maiores são representativos de estruturas de boa qualidade. Adotando-se esse critério, observa-se que todos os segmentos apresentam $R > 100$ m, estando, portanto, em boas condições estruturais.

Quanto ao produto Rd, segundo MOREIRA (1977), considera-se $Rd = 5.500$ como um valor médio representativo e indicador do estado do pavimento, nos casos de existência de camada de base estabilizada granulometricamente. Valores de Rd inferiores a 5.500 indicam a existência de alguma deficiência estrutural do pavimento e/ou do subleito, e os valores de Rd superiores a 5.500 indicam um bom comportamento do

Fig. 19: Linha elástica e raio de curvatura de uma bacia de deformação.

(a) - Linha elástica - as curvas 1 e 2 representam deformadas obtidas em dois locais diferentes da superfície de um mesmo pavimento, causadas pela aplicação da carga P . A deflexão (d) é a mesma em ambos os casos, indicando aparentemente uma mesma capacidade estrutural. Contudo a análise da deformada indica condições estruturais bem distintas para um mesmo valor de deflexão máxima (MOREIRA, 1977).

(b) - Determinação do raio de curvatura - é o raio do círculo que melhor se ajusta à curva no ponto correspondente à deflexão máxima (MOREIRA, 1977).

Tabela 16: Valores de raios de curvatura e produto Rd, determinados nas campanhas de 1990 e 1991.

SEGMENTO	ANO	LADO DIREITO				LADO ESQUERDO			
		D ₀ ⁴	D ₂₅ ⁵	R ⁶	Rd	D ₀	D ₂₅	R	Rd
SCC/LR 1	1990	45.0	36.0	347.0	15615	58.0	44.0	223.0	12934
		54.0	41.0	240.0	12960	67.0	55.0	260.0	17420
		50.0	37.0	240.0	12000	66.0	48.0	174.0	11484
	1991	46.0	37.5	368.0	16928	61.5	43.0	168.9	10387
		49.5	34.5	208.0	10296	61.5	40.0	145.3	8936
						53.5	36.0	178.6	9555
SCC/LR 2	1990	66.0	46.0	156.0	10296	54.0	40.0	223.0	12042
		79.0	53.0	120.0	9480	87.0	63.0	130.0	11310
		77.0	50.0	116.0	8932	62.0	43.0	164.0	10168
	1991	74.0	50.0	131.0	9694	67.0	48.0	172.0	11524
CCC	1990	42.0	30.0	260.0	10920	54.0	40.0	223.0	12042
		50.0	40.0	313.0	15650	87.0	63.0	130.0	11310
		42.0	31.0	284.0	11928	62.0	43.0	164.0	10168
	1991	37.5	26.5	284.0	10650	49.5	34.5	208.3	10311
						43.5	32.0	271.7	11819
						46.0	33.0	240.4	11058
CC	1991	83.0	53.0	104.2	8649	87.5	57.5	104.2	9117
		85.0	56.0	107.7	9154	67.5	41.0	117.9	7958
		67.5	43.0	127.5	8606	67.0	40.0	115.7	7752

⁴D₀ = deflexão (máxima) no ponto de prova, em 1/100mm.

⁵D₂₅ = deflexão a 25cm do ponto de prova, em 1/100mm..

⁶R = raio de curvatura, em metros.

conjunto sob a ação das cargas solicitantes. Já para pavimentos com bases estabilizadas com ligantes hidráulicos o valor limite de R_d é 10.000 (FABRÍCIO et al, 1988).

No caso das bases estabilizadas com cal e cal+cimento, como as aqui estudadas, não há ainda parâmetros definidos. Verifica-se, entretanto, que a maioria dos pontos apresentam $R_d > 10.000$ e que todos os pontos são superiores a 5.500. Embora os dados disponíveis sejam poucos, observa-se, considerando-se apenas os dados de 1990, que segmentos SCC/LR 1 e CCC, tratados com cal cálcica, apresentam valores de $R_d > 10000$, enquanto que o SCC/LR 2, tratado com cal dolomítica, registra valores mais baixos. Os dados de 1991, revelam valores < 10000 também para o SCC/LR 1, todos no lado esquerdo, indicando que houve alteração (degradação) das condições estruturais nesta faixa. O segmento CC, tratado com cal dolomítica, apresenta os valores de R_d mais baixos dentre os segmentos analisados.

- Avaliação do estado da superfície

A avaliação do estado da superfície da pista é realizada, por sua vez, através de observações diretas (visuais) da superfície de rolamento. Em uma ficha especial com um esquema de pista, são identificados, localizados (estacas) os eventos observados e delimitadas as suas áreas de ocorrência (medidas): trincas, remendos, "panelas", desgaste superficial, deformação plástica da base ("borrachudo"), deformação plástica severa ("jacaré"), etc.

Na Tabela 17 estão sumarizados os principais problemas diagnosticados em duas avaliações realizadas, uma em 1990 e outra em 1993, bem como as áreas (em m^2 e %) por eles afetadas em cada segmento.

Como é possível observar pelos dados de área total com defeitos em cada segmento (Tabela 17 e Fig. 20), o SCC/LE é o que se apresenta em melhores condições nas duas avaliações realizadas, enquanto que nos demais a área comprometida por

Fig. 20: Evolução dos defeitos da pista Mariana - Porto Quebra Canoa, levantados em três campanhas de avaliação do estado da superfície.
a) defeitos da pista incluindo o desgaste superficial
b) defeitos da pista sem incluir o desgaste superficial.

defeitos foi aumentada entre 1990 e 1993. Os aumentos foram mais significativos nos segmentos SCC/LR 1, SCC/LR 2 e CCC, os quais de cerca de 1,5% (ou menos como no caso do CCC) de área afetada em 1990, passaram a apresentar, em 1993, mais de 8% da superfície com defeitos. O segmento CC, ao contrário, se destaca por possuir já na primeira avaliação uma área com defeitos mais alta, em termos percentuais (3,8%), do que os outros, mas que evoluiu relativamente pouco no tempo considerado.

Os maiores aumentos das áreas com defeitos verificados em 1993 ocorreram principalmente devido ao aparecimento de áreas com desgaste superficial. Esse desgaste superficial apareceu de forma mais extensiva nos segmentos situados na parte inicial do trecho, até o Km 15, onde se localiza o distrito de Quinzópolis. Este trecho suporta maior volume de tráfego, fazendo a ligação entre os distritos (Quinzópolis e Panema) e a cidade de Santa Mariana, enquanto que no setor final o volume é bem reduzido, atendendo apenas ao distrito de Panema, no Km 25.

O desgaste superficial é um problema relacionado à capa asfáltica, desvinculado, portanto, do comportamento da base. Os outros tipos de defeitos (trincas, deformação plástica, etc...), ao contrário, dizem respeito à base e podem comprometê-la estruturalmente.

O gráfico **b** da Fig. 20, apresenta a evolução das áreas com defeitos nos segmentos, excluindo-se aquelas afetadas pelo desgaste superficial. Verifica-se que os segmentos CCC e SCC/LE apresentam <0,3% de áreas com defeitos (trincas), enquanto que os segmentos SCC/LR 1, SCC/LR 2 e CC têm entre 3,4% e 4,0% de áreas comprometidas principalmente com deformação plástica e trincas.

Quanto à evolução dos tipos de defeitos, verifica-se que em 1990 a deformação plástica e as trincas eram os principais defeitos diagnosticados, variando a sua importância de segmento para segmento, como pode ser observado na Tabela 17. Em 1993, entretanto, as áreas dos segmentos afetadas por deformação plástica aumentaram significativamente, em particular nos segmentos SCC/LR 1 e 2 (mais neste último).

Os segmentos proporcionalmente mais afetados por defeitos, principalmente a deformação plástica, são o CC, seguido pelo SCC/LR 2 e SCC/LR 1.

Confrontando-se os dados (diretamente das fichas de campo - mapa) do levantamento do estado da superfície, realizado em 1993, com aqueles das condições físico-hídricas da base nos segmentos estudados (Figs. 14 e 17), observa-se que:

- aparentemente, os problemas de deformação plástica surgem relacionados às áreas da base com baixo grau de compactação nos segmentos SCC/LR 1 e CC;
- no segmento SCC/LR 2, a deformação plástica ocorre nas áreas onde foi atingido o grau de compactação exigido, mas com grau de saturação elevado (de 93% a 99%). De acordo com FAURE (1978), nessas condições, o material atingiu ou está muito próximo do seu Limite de Liquidez.

Capítulo IV

MÉTODO DE ESTUDO E TÉCNICAS DE ANÁLISE

Entre os trabalhos sobre estabilização de solos com aditivos realizados observam-se duas linhas de abordagem preferenciais: uma que se baseia exclusivamente em dados de comportamento geotécnico, seja de materiais testados em laboratório, seja de materiais de pistas experimentais; outra que busca informações a propósito das reações dos aditivos e constituintes dos solos em condições experimentais de laboratório, trabalhando com teores elevados dos aditivos, em geral em meio aquoso, e minerais puros (como a caulinita, esmectitas, ilitas, etc.).

No último caso, os resultados obtidos em condições extremas (saturação de aditivos e água + minerais puros), têm o mérito de indicar as possibilidades de reação entre os constituintes dos solos e os aditivos, mas não esclarecem as reações e os mecanismos em materiais associados naturalmente (principalmente os solos tropicais) e sob condições de umidade relativamente baixas (teor ótimo de compactação). Mais ainda, não esclarecem como se dá a interação aditivos/constituintes do solo em condições de mistura e homogeneização em pista; que estruturas são de fato geradas e quais as suas implicações na capacidade de suporte e estabilidade das camadas obtidas.

Na busca por essas respostas optou-se pela pesquisa dos materiais de pistas experimentais, adotando-se uma metodologia que tem por base o estudo da morfologia dos materiais estabilizados e compactados. Esta investigação morfológica dos solos e materiais estabilizados foi realizada através de métodos macro, meso, micro e submicromorfológicos coordenados e combinados com métodos químicos e mineralógicos.

Segundo TURSINA et al. (1980), a abordagem morfológica realizada em estágios sucessivos, iniciando com o nível macromorfológico e terminando com o submicromorfológico, permite perguntar e responder questões que não aparecem quando um método ou uma série incompleta de métodos é utilizada. As informações são

contínuas e obtidas dentro da estrutura do objeto, integrando-se todos os níveis de organização.

1. METODOLOGIA

As observações morfológicas, principalmente as micromorfológicas, têm contribuído para o entendimento das formas de interação e mecanismos de atuação da cal nos materiais estabilizados (CHAUVEL & NÓBREGA, 1980; CHAUVEL et al, 1983; ROSSI et al, 1983 e 1992; NÓBREGA, 1988). Em função desses resultados obtidos em trabalhos anteriores adotou-se como linha mestra, nesta pesquisa, o estudo da morfologia dos materiais estabilizados (base dos segmentos selecionados) e dos solos naturais (jazidas).

Este estudo morfológico foi realizado em diversas escalas de observação: da macro a submicroscópica.

As observações nas escalas macro e mesoscópica foram feitas em dois momentos diferentes: durante a coleta de amostras (jazidas e segmentos de pista); em laboratório, a olho nu e com o auxílio de lupa binocular, sobre fraturas frescas dos materiais das bases. As organizações (nódulos, zonas mais porosas, zonas mais ricas em aditivos, etc.), assim identificadas, foram separadas manualmente e submetidas a análises químicas (química total) e mineralógicas (Raios X e Infravermelho).

Nas escalas micro e submicroscópica, as observações foram realizadas sobre lâminas delgadas, em microscópio óptico petrográfico, e sobre fragmentos indeformados, em microscópio eletrônico de varredura (MEV). As organizações foram definidas através das relações entre plasma, esqueleto, porosidade e, no caso dos materiais de pista, aditivos. Esta etapa foi fundamental para orientar as análises químicas e mineralógicas de detalhe realizadas através de sonda eletrônica (sondagens químicas pontuais, cortes

transversais e cartografia de elementos). Procurou-se, desta forma, relacionar conteúdo químico e mineralógico a formas, arranjos e associações.

A comparação entre os resultados obtidos com os solos naturais e aqueles dos materiais estabilizados da pista teve como objetivo distinguir as transformações, arranjos e associações resultantes tanto da ação dos aditivos como das técnicas de construção.

Os dados obtidos segundo esta metodologia, foram confrontados com os dados do projeto de engenharia, relatórios de campo e laboratório da fase de construção. Procurou-se, assim, fazer um diagnóstico das influências da técnica de construção no resultado final, a nível micromorfológico, químico e mineralógico.

2. AMOSTRAGEM DE PISTA E JAZIDAS

Em 1991, quatro anos após a construção da estrada, foi realizada a coleta das amostras indeformadas da base dos segmentos de pista selecionados.

Neste tipo de abordagem, onde a maior parte das observações e análises são realizadas em nível microscópico, a coleta de amostras é de grande importância; ela deve refletir a camada (base) e as possíveis variações verticais geradas na etapa de construção e/ou pelo tráfego ao longo do tempo. Para a coleta de amostras indeformadas da base nos segmentos de pista selecionados adotou-se o seguinte critério:

- os pontos de coleta foram situados sempre na mesma faixa de rolamento e no mesmo rodeio, para que se garantisse as mesmas condições de tráfego. Assim, a coleta foi efetuada, para todos os segmentos, na faixa de rolamento esquerda (sentido Santa Mariana - Porto Quebra Canoa), rodeio externo, de acordo com o esquema da Fig. 21 (a). Nesta faixa circulam os veículos pesados que escoam a produção da área;

- em cada ponto foram amostrados o topo, a parte central e a base da camada (Fig. 21b). Foram retiradas amostras indeformadas, orientadas, para a confecção de lâminas delgadas, e diversos fragmentos para análises (químicas, mineralógicas e morfológicas).

No campo foram medidas as espessuras das bases e avaliados (visualmente) o grau e a uniformidade de compactação.

Nos segmentos estudados foram utilizados solos provenientes de duas jazidas, situadas ao longo da estrada. Os perfis de solos dessas jazidas foram descritos e amostrados de acordo com o "Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo" (LEMOS & SANTOS, 1984). Foram também retiradas, de cada horizonte, amostras indeformadas e orientadas para a fabricação de lâminas delgadas.

3. TÉCNICAS DE ANÁLISE

Para o desenvolvimento da pesquisa recorreu-se a várias técnicas de análise que foram executadas em diferentes laboratórios:

- impregnação e confecção das lâminas delgadas de solos e dos materiais de pista: Laboratórios de Impregnação e Laminação do Instituto de Geociências/USP;
- análises micromorfológicas por microscopia óptica e microscopia eletrônica (MEV), análises químicas pontuais (sondagens eletrônicas), cartografia dos elementos, mineralogia por difração de Raios X e análises químicas totais: Laboratoire de Petrologie de la Surface e Laboratoire de Mineralogie - Petrologie, da ORSTOM, Centro de BONDY, França;
- análises químicas segundo cortes transversais: Microsonda Eletrônica da Universidade Paris VI (Jussieu);

Fig. 21: Esquema de amostragem ao longo do segmento (a) e da base (b)

- análises mineralógicas por Infravermelho: Laboratoire de Petrologie de la Surface, Universidade de Poitiers, França.

3.1. Lâminas Delgadas - Preparação do Material

Dada a natureza dos materiais (solos e materiais estabilizados) foi necessário endurecê-los, através de impregnação com uma resina acrílica, para a obtenção de lâminas delgadas.

A técnica de preparação para a impregnação do material prevê uma secagem em estufa a aproximadamente 40°C. Como a temperatura pode interferir nos produtos neoformados, optou-se pela secagem a vácuo. Assim, as amostras indeformadas (solos e bases de pista) foram submetidas inicialmente a uma secagem ao ar e depois a uma secagem em dessecador, a vácuo.

Utilizou-se para a impregnação uma resina polylite (T-208), pré-acelerada, diluída em monômero de estireno (± 35 ml para 100 ml de resina) e com algumas gotas de catalizador (de 3 a 4 gotas de peróxido de metil etil cetona, para estas proporções).

A impregnação foi feita em dessecador, a vácuo, com adição de resina em pequenas quantidades, várias vezes, até que se completasse o processo.

Depois de endurecidas, as amostras foram cortadas em fatias, cujas superfícies a serem laminadas foram novamente impregnadas. A reimpregnação foi realizada com uma solução de resina e acetona (na proporção de 1:1) e catalizador (2 gotas para 50 ml de solução).

Esta técnica de impregnação se baseia naquela proposta por VERBEKE (1969).

O material assim preparado foi laminado, de acordo com as técnicas empregadas no Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências - USP.

Em função das análises com microsonda eletrônica a lâmina delgada não foi recoberta com lamínula.

3.2. Micromorfologia

A análise micromorfológica dos materiais foi realizada com o auxílio de duas técnicas: microscopia óptica sobre lâminas delgadas e microscopia eletrônica de varredura sobre fragmentos.

- Microscopia óptica

A descrição das lâminas delgadas em microscopia óptica obedeceu aos critérios e terminologia propostos por BREWER (1976). Com relação à nomenclatura foi utilizada, sempre que possível, a tradução proposta por CURI et al. (1985) seguida, quando necessário, da denominação na língua original.

Foi realizada a caracterização dos materiais em termos de organização (plasma, esqueleto, poros, orientações plásmicas e de esqueleto, produtos de neoformação - associações, distribuição, formas, orientações) e a identificação e seleção de sítios representativos dos arranjos predominantes para análises de detalhe com o auxílio de outras técnicas (microsonda eletrônica).

Esta etapa de observações sobre as lâminas delgadas em microscópio óptico petrográfico foi realizada da seguinte forma:

- preparação de uma ficha de observação para cada lâmina, tendo ao alto, no canto direito, um desenho da lâmina. Nesse esboço, obtido através de cópia da lâmina sobre mesa de luz, destacam-se as organizações visíveis sem auxílio de microscópio - morfologia macroscópica. Para as observações ao microscópio propriamente, foram traçados vários círculos, 3 em cada lado da página, cada um deles com aproximadamente 8 cm de diâmetro e cortado por 2 coordenadas perpendiculares entre si;
- para cada lâmina delgada, as observações ao microscópio óptico foram realizadas com luz natural e luz polarizada, utilizando-se inicialmente um aumento de 25X, para o reconhecimento geral do material. Após este reconhecimento e feita a identificação dos materiais e organizações presentes (fundo matricial, feições especiais, porosidade, esqueleto, plasma, produtos de reação, etc.), foram selecionados sítios representativos dessas organizações, para estudos de detalhe. As observações realizadas para cada sítio, neste nível de aumento, foram esquematizadas na ficha de observação. Os esquemas são fundamentais para a orientação das análises químicas pontuais ou em cortes transversais e, ainda, imagens de raios X, na microsonda eletrônica.
- com aumentos de 50 e 100X, foram observados os aspectos relacionados ao plasma (estrutura, orientação, natureza mineralógica) e aos produtos neoformados. Nos sítios, definidos na escala anterior, muitas vezes foram necessários detalhamentos das organizações, principalmente daquelas a nível plásmico, e novamente foram selecionados dentro desses, sub-sítios. Da mesma forma que na situação anterior, fez-se um esquema das observações para a orientação das análises em microsonda;
- os sítios e sub-sítios selecionados foram delimitados sobre a lâmina delgada com o auxílio de uma caneta de ponta fina, e também no desenho esquemático da lâmina, no alto da página, para facilitar a localização quando das análises em microsonda.

- Microscopia eletrônica de varredura

As observações com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura, são cada vez mais comuns como complementares às aquelas obtidas com a microscopia óptica, nos estudos de micromorfologia dos solos. O mesmo fenômeno vem ocorrendo nos estudos da química e mineralogia dos cimentos. Os produtos de hidratação do cimento são difíceis ou impossíveis de serem detectados pela microscopia óptica e, assim, a microscopia eletrônica de varredura tem sido um dos instrumentos mais empregados nesse tipo de investigação (REGOURD & HORNAIN, 1975).

No microscópio eletrônico de varredura a amostra é submetida a um bombardeio por feixe de elétrons primários emitidos por um filamento de tungstênio. No ponto de impacto do feixe, as interações entre os elétrons incidentes e o alvo (amostra) são múltiplas. Os elétrons se encontram sob várias formas:

- os elétrons: secundários, retrodifusos, adsorvidos, transmitidos, difratados, de condução;
- os fótons: luminosos (infravermelhos, visíveis, ultravioleta) e fótons X.

Os elétrons secundários emitidos pela superfície bombardeada são transformados em sinal com a ajuda de um cintilador e de um fotomultiplicador gerando a imagem. As imagens da topografia da amostra apresentam uma grande resolução e profundidade de campo, permitindo a visualização de detalhes da microestrutura - interior dos poros e interstícios entre partículas.

Quando as amostras não são condutoras, como os solos e os cimentos, é necessário recobri-las com um material condutor. A técnica mais comum empregada é o recobrimento da superfície a ser estudada por um filme metálico (ouro, níquel ou platina), de 100 a 200Å de espessura, sob vácuo.

SMART & TOVEY (1982) apresentam detalhadamente o princípio de funcionamento do microscópio eletrônico de varredura, os procedimentos básicos de

operação do aparelho, preparação das amostras e as condições possíveis de manipulação para garantir bons resultados.

A microscopia eletrônica de varredura, possibilita uma visão tridimensional dos materiais, enriquecendo, portanto, as observações feitas bidimensionalmente sobre as lâminas delgadas. Assim, é possível uma caracterização mais precisa da porosidade (formas, arranjos dos poros, tamanhos), das organizações plásmicas e, principalmente, dos produtos neoformados (formas, tamanhos, modos de associação).

Nesta pesquisa, os estudos em microscopia eletrônica de varredura foram realizados com um aparelho CAMBRIDGE, tipo Stereoscan 200, da ORSTOM - Centro de Bondy.

As observações foram feitas sobre fraturas frescas de fragmentos indeformados, metalizados com ouro. Procurou-se sempre obter fragmentos com formas trapezoidais e achatados, para se garantir uma melhor metalização e, também, melhores condições de observação da superfície. Para cada material estudado (topo da camada, centro ou parte inferior) foram preparados vários fragmentos, em média 5.

A exploração de materiais como solos, principalmente os argilosos, não é tarefa muito fácil. Os solos ferralíticos (lateríticos) se apresentam como uma massa dividida em microagregados, onde não se identificam os minerais que a constituem. Assim, apenas aspectos ligados à porosidade e à organização são possíveis de serem investigados.

Para os solos estabilizados a dificuldade é a mesma. Os produtos neoformados pelas reações entre os constituintes dos solos e os aditivos são em geral de tamanho muito reduzido e de distribuição localizada. Assim, é necessário que se proceda à observação de forma criteriosa, buscando primeiro, com pequenos aumentos (100X), reconhecer as organizações plásmicas identificadas sobre as lâminas delgadas e, depois, com aumentos crescentes, fazer uma exploração detalhada de certas zonas do plasma e no interior dos poros. Após o reconhecimento de uma área onde os aditivos atuaram e onde foi detectada a presença dos produtos neoformados, as observações subseqüentes

são realizadas com aumentos maiores (1.000 a 5.000X) tendo em vista a caracterização morfológica.

Esse procedimento permite que se reconheçam os diversos níveis de organização que o material apresenta, e a sua seqüência de encaixamento, desde as formas macroscópicas observadas no campo, às microscópicas observadas sobre as lâminas (100X) e às submicroscópicas observadas ao MEV (até 5.000X).

Apesar da preparação das amostras (metalização com ouro) ser inadequada à obtenção de dados químicos, procedeu-se paralelamente às observações morfológicas e detecções químicas qualitativas.

3.3. Análises químicas

A partir das informações adquiridas pelo estudo morfológico dos materiais efetuou-se as análises químicas utilizando-se várias técnicas.

- Química total

As análises químicas foram realizadas sobre a amostra total e sobre as organizações e materiais reconhecidos macroscopicamente, finamente moídos.

Por se tratar de solos, materiais alterados e estabilizados com aditivos, adotou-se a análise por ataque tri-ácido (mistura de SO_4H_2 + NO_3H e HCl). Ao contrário da análise química total por fusão alcalina que dá a composição bruta de cada elemento do solo, em particular da sílica proveniente tanto do quartzo quanto de outros silicatos primários ou secundários (argila), a análise tri-ácida separa, dentro de uma certa medida, os elementos

destes diferentes constituintes. A parte atacada é constituída essencialmente por minerais secundários: argilas e silicatos hidratados, óxidos mais ou menos cristalizados. Pode-se, assim, determinar com mais precisão as relações moleculares características destes minerais: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{FeO}_3$. Os elementos foram dosados através de várias técnicas (as mais adequadas para cada elemento): gravimetria para o SiO_2 ; plasma para o CaO , o MgO e o MnO_2 ; emissão de chama para o Na_2O e o K_2O ; colorimetria para o TiO_2 , etc. Os resultados são apresentados na forma de óxidos.

- Análises químicas pontuais e em cortes transversais

As análises químicas pontuais foram efetuadas através de espectrometria de raios X, com o auxílio de microsonda acoplada ao microscópio eletrônico. A espectrometria de emissão de raios X é um importante método de análise elementar não destrutiva (microanálise X).

Como foi visto anteriormente a propósito da microscopia eletrônica de varredura, a amostra é bombardeada por um feixe de elétrons, produzindo-se várias formas de interação entre esse feixe eletrônico e o alvo. Os elétrons secundários emitidos pela amostra geram a imagem (MEV) e os fótons X (espectro de raios X), por sua vez, permitem a determinação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos que compõem a amostra.

Existem dois tipos principais de espectrometria em microanálise X: a espectrometria por dispersão de comprimento de onda (WDS - *Wavelength Dispersive Spectrometer*); a espectrometria por seleção (ou dispersão, segundo algumas traduções) de energia (EDS).

T2189

- Espectrometria WDS:

O espectrômetro de raios X WDS é constituído por um cristal monocromador, um detector a fluxo gasoso e uma cadeia analógica. O espectro de raios X emitido pela amostra é analisado pelo monocromador. Os diferentes comprimentos de onda λ são refletidos pelos diferentes planos reticulares do cristal monocromador, conforme a lei de BRAGG, $n \lambda = 2 d \sin \theta$ (θ = ângulo de reflexão). A condição da reflexão de BRAGG só permite a detecção de um comprimento de onda. Os fótons X de cada radiação monocromática são captados pelo detector que, por intermédio de uma cadeia eletrônica, transforma o número de fótons em intensidade ou número de impulsões por segundo. Um cristal analisador é específico para uma gama determinada de comprimentos de onda. Vários cristais intercambiáveis são necessários para cobrir um grande domínio de comprimentos de ondas (REGOURD & HORNAIN, 1975).

MORLEVAT (1987) e POUCHOU (1987), apresentam detalhadamente a aparelhagem, o funcionamento e os procedimentos operacionais para se obter resultados adequados.

- Espectrometria EDS:

O espectrômetro de raios X EDS é composto por um semicondutor Si(Li) criostado, uma cadeia analógica com pré-amplificador e amplificador, um conversor analógico numérico e uma memória de estoque.

O fóton X emitido pela amostra é transformado pelo semicondutor em uma carga elétrica proporcional à energia do fóton X incidente, característica de cada elemento. A impulsão produzida por cada fóton é amplificada (amplificadores) e dirigida para um conversor multicanal, onde cada canal representa um determinado domínio de energia. Todas as impulsões do feixe policromático são aceitas simultaneamente, estocadas e classificadas. Obtém-se, assim, o registro instantâneo e total das raias características em função da energia - espectro total de emissão X.

Os equipamentos, os princípios de funcionamento e condições operacionais são apresentados detalhadamente por BIZOUARD (1987) e MOLINS (1989).

Tanto um sistema (EDS) quanto outro (WDS) apresenta vantagens e desvantagens. O sistema WDS tem uma boa resolução energética final que permite detectar raios de emissão vizinhos sem superposição; melhor relação pico/fundo, melhor determinação dos raios de elementos traços. Apresenta como desvantagem a necessidade de uma sonda mais energética que pode, conseqüentemente, provocar volatilização, contaminação e migração de elementos no decorrer das análises. Além dessas desvantagens, GONÇALVES (1987) chama a atenção para a necessidade de um polimento perfeito da amostra (nem sempre conseguido com as amostras de materiais alterados, ricos em argilo-minerais, fracamente impregnados pela resina) e ainda, a impossibilidade de visualizar o espectro de emissão em certas microzonas onde existem misturas de mineral primário e fases de alteração.

O sistema EDS permite a visualização do espectro total de emissão X, possibilitando comparações rápidas das composições químicas entre minerais, em diferentes pontos de um mesmo mineral ou, ainda, de uma fase específica de alteração. O detector Si(Li) permite utilizar a sonda fracamente energética (15 Kv-1,5 nA) limitando os riscos de contaminação, volatilização e migrações de elementos. As desvantagens deste sistema estão relacionadas às freqüentes superposições dos espectros de emissão, que demandam o auxílio de programas complexos de computação para resolvê-las, e a não detecção de elementos químicos de número atômico inferior a ($Z < 11$).

Nesta pesquisa as análises químicas pontuais por espectrometria de raios X (microanálises X) foram efetuadas sobre as lâminas delgadas, nos sítios previamente estudados e escolhidos em microscopia óptica, determinando-se os seguintes óxidos: Al_2O_3 , SiO_2 , SO_3 , K_2O , CaO , MgO , TiO_2 e Fe_2O_3 .

As lâminas delgadas foram previamente metalizadas com carbono, a vácuo. O carbono garante uma boa determinação química quantitativa, mas a imagem obtida não apresenta a mesma qualidade. No caso dos solos e materiais estabilizados, fica difícil o reconhecimento visual dos pontos que se quer dosar. Nestes casos os esquemas

desenhados nas fichas de observação ao microscópio óptico se constituem em instrumentos de orientação valiosos - grãos do esqueleto e fissuras são os melhores elementos-guias.

Utilizou-se nessas análises a microsonda eletrônica CAMBRIDGE (acoplada ao microscópio eletrônico), da ORSTOM - Centro de BONDY, que opera com o sistema EDS e apresenta os dados calculados e corrigidos pelo programa ZAF. Este programa de computação leva em conta, para o cálculo, os efeitos do número atômico (Z), da Absorção (A) e da Fluorescência Secundária (F).

Sobre as lâminas delgadas de algumas amostras, previamente selecionadas (em função dos resultados obtidos em etapas anteriores), foram efetuadas análises químicas pontuais ao longo de cortes transversais. Nestes cortes de 100 μ de comprimento, a cada 1 μ é feita uma sondagem química. Procurou-se, com esta técnica, identificar as formas de interação entre os solos e os aditivos. Assim os cortes transversais cruzam zonas com organizações características e diferenciadas.

Os cortes transversais foram realizados com uma microsonda eletrônica CAMECA SX 50, da Universidade Paris VI (JUSSIEU), que opera em sistema WDS e apresenta os dados corrigidos com o programa PAP (Modelo de POUCHOU e PICHOU - POUCHOU, 1989).

- Cartografia dos elementos - imagens de raios X

A espectrometria de raios X, além de permitir a determinação da composição química pontual, possibilita a obtenção de uma imagem (imagem de raios X) que mostra a distribuição dos elementos químicos em uma determinada zona da amostra.

Em espectrometria EDS, o detector coleta a totalidade do sinal emitido pela amostra, e somente a fração correspondente à irradiação característica do elemento selecionado é utilizada para constituir a imagem.

A cartografia dos elementos é uma análise semiquantitativa, os resultados são apresentados em faixas (classes) de porcentagens relativas de concentração do elemento, representados graficamente por cores diferentes, determinadas pelo operador.

Nesta pesquisa, praticamente em todos os sítios e sub-sítios selecionados por microscopia óptica, foram efetuadas imagens de raios X para os elementos: Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO , SO_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 . Na imagem, optou-se pela distribuição dos elementos em 7 classes de concentrações (número máximo permitido pelo equipamento) representadas pelas cores:

cores	teores
rosa	0 - 14,28%
branco	14,29 - 28,57%
cinza claro	28,58 - 42,85%
cinza escuro	42,96 - 57,14%
preto	57,15 - 71,42%
azul claro	71,43 - 85,71%
azul escuro	85,72 - 100,00%

As imagens de raios X foram obtidas com a microsonda eletrônica (EDS) CAMBRIDGE, da ORSTOM - Centro de BONDY.

3.4. Mineralogia

As análises mineralógicas foram efetuadas através de difração de raios X e espectroscopia de absorção de infravermelho.

Nos fragmentos das amostras foram identificados e separados manualmente três tipos principais de "materiais", cujo arranjo (organização e composição) os destacam macroscopicamente:

- materiais esbranquiçados que aparecem como pontos dispersos aleatoriamente na camada e os revestimentos esbranquiçados depositados nas fissuras;
- materiais correspondentes às zonas mais porosas e também de coloração avermelhada mais clara (plasma mais claro);
- materiais de coloração mais escura (cor original do solo) e mais densos.

Sobre esses materiais foram realizadas análises por difração de raios X e espectrometria infravermelho.

- Análises por Difração de Raios X

A identificação dos minerais constituintes do solo, principalmente aqueles da fração argila, é tradicionalmente realizada através de análises por difração de raios X.

Especialmente indicada para a identificação de minerais de pequeno tamanho (fração argila), esta técnica também tem sido utilizada para a caracterização dos produtos de hidratação do cimento portland.

Entretanto, quando em misturas solo-aditivos, as condições são ainda mais complexas e várias dificuldades adicionais aparecem: pode ocorrer a sobreposição de raios dos produtos neoformados com as dos minerais do solo; a baixa cristalinidade dos produtos pode gerar apenas uma ou algumas (poucas) raios; a quantidade de produtos neoformados em relação à massa do solo pode ser insuficiente para ser detectada por esta técnica (NÓBREGA, 1988).

Assim, apesar das limitações apresentadas para a identificação dos produtos neoformados em misturas, a difração de raios-X evidencia as transformações sofridas, principalmente a nível da cristalinidade, pelos constituintes dos solos.

Tendo em vista as características físico-químicas dos materiais estabilizados com aditivos não se procedeu a nenhuma forma de separação ou concentração de frações através de procedimentos químicos. A mudança no ambiente físico-químico necessária para essas separações (de argila, por exemplo), podem interferir nos produtos de neossíntese formados, principalmente aqueles decorrentes das reações da cal com os constituintes do solo. Assim, as análises por difração de raios X foram realizadas apenas sobre as amostras totais (pó) em aparelho equipado com tubo de cobre e conjunto acoplado a microcomputador.

- Análises por Espectroscopia de Absorção de Infravermelho

Os princípios e usos potenciais das técnicas de infravermelho nos estudos de solos já foram apontados e revistos por vários autores, entre eles FRIPIAT (1960), LYON (1964), MORTENSEN et al (1964), FARMER & RUSSELL (1967), FARMER (1968, 1974, 1976, 1979), WHITE (1971, 1977), CHAUSSIDON (1972a,b), RUSSELL (1974), FARMER & PALMIERI (1975), WHITE & ROTH (1986). A contribuição desta técnica na caracterização dos produtos de hidratação do cimento aparece nos trabalhos de HENNING & DANOWSKI (1965), FARMER et al (1966), HENNING (1965, 1966, 1974), HENNING et al (1967), SPEAKMANT et al. (1967), HENNING & WAGNER (1968), RYSKIN et al. (1969ab), HENNING & GERSTNER (1972), etc.

O espectro de um mineral tem uma feição característica, como uma "impressão digital" (FARMER, 1964), que permite análises qualitativas e quantitativas dos compostos. As bandas aparecem em função da vibração dos átomos ou íons que se movem uns em relação aos outros e causam uma mudança no momento dipolar da molécula. Quando incide sobre a molécula luz infravermelha de mesma frequência, há

absorção de energia e aumento da amplitude daquela vibração. Quando a molécula volta do estado excitado ao estado normal de partida a energia absorvida é libertada em forma de calor.

O espectro infravermelho fornece uma evidência direta dos processos químicos e físicos que comandam a adsorção nas superfícies, e estas reações podem, por sua vez, servir para diferenciar os vários tipos de superfície presentes em um sistema heterogêneo como a fração argila dos solos (FARMER & PALMIERI, 1975) e os produtos de hidratação do cimento (HENNING, 1974).

Espectros de absorção no infravermelho são obtidos geralmente colocando-se a amostra em um espectrofotômetro infravermelho de feixe simples ou duplo, e medindo a intensidade relativa da luz transmitida (e portanto absorvida) em função do comprimento de onda (ou número de onda). O número de onda é diretamente proporcional à energia absorvida ($K = E/hc$) e o comprimento de onda é inversamente proporcional à energia absorvida ($\lambda = hc/E$, $\lambda = 1/k$).

A radiação infravermelha é, portanto, caracterizada pelo seu comprimento de onda, medido em microns (10^{-4} cm), ou pela sua frequência, medida em número de onda (cm^{-1}), isto é, o comprimento de onda correspondente medido em centímetros. Assim, um comprimento de onda de $10\ \mu$ (10^{-3} cm) corresponde a uma frequência de $1.000\ \text{cm}^{-1}$.

A região do espectro infravermelho que interessa ao estudo dos componentes dos solos, segundo WHITE & ROTH (1986), está compreendida entre 4.000 e $200\ \text{cm}^{-1}$ ($2,5$ a 50μ).

Para a determinação do espectro de absorção de infravermelho são utilizadas várias técnicas de preparação da amostra. A mais comumente empregada nos estudos dos componentes minerais dos solos, e que também foi usada nesta pesquisa, é a pastilha de KBr. O brometo de potássio (haleto de álcali) não absorve luz infravermelha na região $2,5 - 15\mu$ e, assim, obtém-se um espectro completo da amostra.

Preparação da pastilha de KBr:

Os autores (FARMER, 1964; RUSSELL, 1974; WHITE & ROTH, 1986, entre outros) chamam a atenção para a importância do tamanho da partícula na qualidade do espectro. Em função da faixa de comprimento de onda utilizada 2,5 a 50 μ o tamanho da partícula recomendado é aquele da fração argila ($< 2\mu$), as partículas maiores devem ser reduzidas a esse tamanho.

Para a preparação da pastilha são misturados 0,5 a 1 mg da amostra com 300 mg de KBr (brometo de potássio), bem secos, em gral de ágata. A mistura é colocada na estufa a 45°C durante uma noite. Após este período são preparadas as pastilhas em prensa hidráulica, sob alta pressão (9.000 a 11.000 Kg) e vácuo. A pastilha obtida é mantida em estufa a 60°C durante uma noite.

A pastilha ideal tem aproximadamente 10 mm de diâmetro e 1 a 2 mm de espessura e é transparente.

A determinação do espectro é realizada colocando-se esta pastilha em um suporte especial, ao lado de uma pastilha de referência de KBr puro.

Nesta pesquisa utilizou-se o espectrofotômetro NICOLET, do Laboratório de Petrologia de Superfície, Universidade de Poitiers, França.

Capítulo V

OS SOLOS E AS MISTURAS

O solo, quando empregado como material para a construção de uma base ou sub-base de estrada, sofre várias transformações e em diferentes níveis:

- ao ser retirado da jazida perde a sua organização em horizontes. O material distribuído ao longo da pista é uma mistura de vários horizontes, que na natureza se formaram em função de condições específicas (principalmente as condições climáticas, fluxos hídricos internos, matéria orgânica, etc.) e que podem apresentar, em decorrência delas, comportamento físico-químico, hídrico e mecânico particular;
- na pista, é pulverizado até que os agregados atinjam um tamanho mínimo desejado. Isto pode significar, para muitos materiais, a destruição dos agregados naturais com o rompimento de ligações interparticulares. Aqui, parte da história pedológica é apagada, especialmente aquela referente à estrutura;
- o material pulverizado é umedecido e compactado, ou seja, é submetido a diferentes condições hídricas e esforços mecânicos. As partículas se reorganizam e uma nova estrutura é engendrada. Ao final, o material compactado apresenta padrões de comportamento hídrico e mecânico distintos do material original.

A aplicação de aditivos, como a cal e o cimento, por sua vez, altera as condições físico-químicas gerais e pode transformar os constituintes minerais (preferencialmente os argilosos), criar e adicionar outros com propriedades físicas e químicas particulares, promovendo novos arranjos que também interferem na organização e comportamento final. Essas transformações e reorganizações são percebidas em várias escalas de observação: da macro à submicroscópica.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com as análises morfológicas, mineralógicas e químicas nos solos e nas misturas, para esses diferentes

níveis, e discutidos os efeitos da compactação e da adição de cal e cimento na composição dos materiais e na estrutura final obtida.

1. OS SOLOS

A manipulação dos solos tropicais (ferralíticos) como materiais de construção implica, como já foi mencionado no capítulo I, em deterioração de determinadas propriedades físicas e mecânicas, resultante de transformações ao nível da organização das partículas (destruição da estrutura granular). Essas transformações estão, de um lado, diretamente correlacionadas com as condições originais do solo e, de outro, com os novos parâmetros hídricos e energéticos proporcionados. Desta forma, para se compreender o produto final - solo compactado utilizado como base de pavimento - é necessário o conhecimento das características e propriedades originais do solo, das relações destas com o comportamento hídrico e mecânico, e da sua evolução com a manipulação (trabalho).

1.1. Características morfológicas, químicas e mineralógicas

O Latossolo Roxo, empregado em dois segmentos, é argiloso (74% de fração argila), como foi visto no Capítulo III, e as suas características morfológicas variam pouco ao longo do perfil. Apresenta, ao nível micromorfológico, uma estrutura contínua em microagregados granulares, cujos tamanhos variam em média entre 80 e 120 μ no eixo maior. Os agregados maiores podem atingir até 400 μ .

Os microagregados têm formas arredondadas (globulares) e são constituídos principalmente por plasma vermelho-escuro, isótropo, e orlados, em geral, por estreita faixa de plasma vermelho mais claro a vermelho-amarelo, anisótropo e argilassépico, que às vezes "solda" os microagregados entre si (Foto 01, Prancha I). Esses microagregados correspondem aos micronódulos descritos por CHAUVEL (1976) em solos vermelhos ferralíticos, em Casamance (Senegal), e reconhecidos por PEDRO et al. (1976), CHAUVEL & NÓBREGA (1980), CARVALHO et al (1981 e 1983) e NÓBREGA (1988) em outros Latossolos Roxos do Estado de São Paulo. Desta forma o plasma vermelho-escuro, isótropo, se individualiza como micronódulos no interior do plasma vermelho mais claro, que constitui o fundo matricial.

Os grãos do esqueleto, pouco numerosos (5%), compostos por quartzo e minerais escuros (ilmenita e magnetita), aparecem encrustados no plasma, no interior dos micronódulos.

A partir de 1m de profundidade o plasma vermelho-claro a vermelho-amarelo se torna mais abundante e cada vez mais freqüente (Foto 02, Prancha I), chegando a constituir, a 3 metros, mais de 50% do plasma total. Esse plasma apresenta, nas zonas onde domina, uma forte tendência à individualização, no seu interior, de pequenos nódulos (< de 50 μ) de plasma vermelho-escuro isótropo.

Os plasmas que compõem os micronódulos e o fundo matricial são, de acordo com as análises mineralógicas por difração de raios X, constituídos essencialmente por caulinita e hematita (Fig. 22). A caulinita é parcialmente desordenada nos eixos **a** e **b**, de acordo com os padrões apresentados por BRINDLEY & SOUZA SANTOS (1963), reproduzidos em THOREZ (1976). A presença da gibbsita é sugerida por um pequeno pico, com base alargada, a 4,86 Å e outro a 2,45 Å.

A espectrometria por infravermelho (Fig. 23) confirma a predominância da caulinita, com as bandas características a 3.697 e 3.620 cm^{-1} , e a baixa cristalinidade deste mineral com a ausência da banda a 3.669 cm^{-1} (FARMER & PALMIERI, 1975). A ausência das bandas 3.669 e 938 cm^{-1} das caulinitas, observada em análises de Latossolo Roxo da região de Ribeirão Preto (SP) por GONÇALVES (1987), foi considerada, também,

PRANCHA I

MICROMORFOLOGIA DOS SOLOS

Foto 1: Latossolo Roxo (microscopia óptica - LP) indeformado - aspecto geral da organização em microagregados granulares (micronódulos - M) e da porosidade interagregados (poros de empilhamento composto - V).

Foto 2: aspecto do plasma vermelho-amarelo (PA) que envolve os microagregados (M) do Latossolo Roxo e promove a redução da porosidade em profundidade (no perfil de solo) - MO¹

¹MO = microscopia óptica

Foto 3: Latossolo Vermelho-escuro (microscopia óptica - LP) indeformado - aspecto geral da organização em microagregados (M) granulares (formas mais irregulares) e da porosidade interagregados (poros de empilhamento composto - V). Observa-se ocorrência de estreitas faixas (ilhas) de plasma orientado (separações plásmicas - SP).

Fig. 22: Difratoograma de raios X da fração argila do Latossolo Roxo (Jazida 2)

Fig. 23: Espectro infravermelho do Latossolo Roxo - amostra total

indicadora de importantes substituições isomórficas pelo Fe em sua estrutura cristalina.

A presença de gibbsita no LR é evidenciada pelo aparecimento das bandas a 3.525 e 3.455 cm^{-1} . Segundo WILSON (1966), citado em FARMER & PALMIERI (1975), a ocorrência de bandas nesta faixa de comprimento de onda é indicativa da presença de gibbsita em baixas concentrações ou com cristalização pobre.

As análises químicas pontuais (Tabela 18) mostram, entretanto, uma variação importante na composição química: o plasma vermelho mais claro (fundo matricial), contínuo, apresenta teores mais baixos de ferro e alumínio e teores mais elevados de sílica do que aquele vermelho-escuro (micronódulos), como se observa no diagrama triangular do sistema Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2 (Fig. 24), situando-se dentro do campo dos materiais lateríticos ricos em caulinita.

Este solo apresenta uma porosidade importante, cerca de 60% a 65%, gerada principalmente pelo arranjo dos microagregados entre si. É constituída por poros de empilhamento composto, que em microscopia óptica aparecem como predominantes, alguns pedotubos e poros cavitários (microporos) intragregados. Na base do perfil, em função da presença mais disseminada do plasma vermelho-claro, contínuo, a porosidade diminui (chega a 30% - 35%), e aumenta a participação da porosidade cavitária em relação aos poros de empilhamento.

A distribuição relativa de plasma e esqueleto é do tipo granular e porfirogrânica (BREWER, 1976) ou pórfiro-enáulica (STOOPS & JONGERIUS, 1975).

Em todo o perfil aparecem glébulas: nódulos ferruginosos vermelhos, compostos essencialmente por hematita; ou nódulos amarelados, resultantes de concentrações de ferro enriquecidas com alumínio (goethita). No diagrama triangular (Fig. 24), ocupam preferencialmente o polo ferrítico (composição química semelhante à laterita ferrítica e à ferrita).

No Latossolo Vermelho-escuro (empregado em um segmento - SCC/LE), argiloso (55% de fração argila), também aparece a estrutura microagregada apresentando, contudo, algumas diferenças em relação àquela do Latossolo Roxo.

Tabela 18: Análises químicas pontuais (microsondagens) - Latossolo Roxo (jazida 2)
Resultados normalizados a 100%

	PONTO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O
PLASMA VERMELHO ESCURO	01	37,37	31,91	24,05	5,50	0,22	0,33	0,33	0,28
	02	35,37	35,12	24,20	4,27	0,18	0,42	0,24	0,21
	03	38,02	33,44	22,78	4,12	0,05	0,65	0,67	0,27
	04	35,63	36,10	23,79	3,40	0,31	0,31	0,28	0,19
	05	37,07	37,41	21,18	3,33	0,08	0,19	0,57	0,15
	06	40,15	32,82	21,01	4,12	0,11	0,60	0,87	0,34
	07	36,21	33,35	23,94	5,11	0,28	0,23	0,73	0,15
	08	34,49	26,81	29,39	7,69	0,11	0,53	0,85	0,12
	09	37,79	33,60	23,67	3,58	0,15	0,44	0,56	0,21
	12	31,51	31,56	31,43	4,98	0,06	0,17	0,23	0,07
PLASMA VERMELHO AMARELO	19	54,52	21,97	17,66	4,17	0,27	0,88	0,40	0,14
	21	47,47	27,40	19,74	3,39	0,12	0,78	1,00	0,10
	22	49,78	24,80	19,44	4,41	0,21	0,57	0,67	0,13
	26	47,07	26,09	18,65	3,57	0,34	2,00	1,87	0,16
	310	45,28	28,39	18,99	5,19	0,13	0,95	0,77	0,30
	4	54,16	17,78	22,62	3,17	0,20	1,08	0,93	0,06
GLÉBULAS	2	30,09	13,67	51,66	2,90	0,13	0,34	0,63	0,58
	21	15,69	21,77	57,72	2,08	0,39	0,51	1,77	0,07
	41	16,93	15,33	64,15	2,11	0,36	0,50	0,60	0,02
	34	11,05	19,32	65,89	2,23	0,10	0,50	0,90	0,01
	42	10,30	10,87	76,86	1,27	0,21	0,38	0,03	0,08
	32	4,20	6,25	86,83	1,78	0,36	0,30	0,17	0,12

Fig. 24: Diagrama triangular do sistema Fe_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 - Latossolo Roxo.

- 1 - plasma vermelho-escuro, isótropo
- 2 - plasma vermelho-amarelo, anisótropo
- 3 - glébulas

Os microagregados apresentam formas irregulares, às vezes arredondadas (globulares), compostos por plasma vermelho-escuro vivo, anisótropo e insépico (Foto 03, Prancha I). Estão orlados por estreita faixa de plasma vermelho-amarelo, que apresenta uma anisotropia mais alta, exibindo orientações plásmicas nas áreas de "colagem" dos microagregados e em torno de poros (estrutura plásmica poro-insépica).

Como se pode observar, comparando-se as Fotos 4 e 5 (Prancha II), obtidas em microscopia eletrônica de varredura (MEV), os microagregados do Latossolo Roxo se constituem em unidades morfológicas arredondadas bem definidas e individualizadas. No Latossolo Vermelho-escuro são, ao contrário, nitidamente irregulares, interligadas por pontes de plasma. Nota-se também que nas bordas dos agregados do LE o plasma se apresenta mais orientado (alinhamentos paralelos às superfícies, indicados na Foto 5) do que no LR. Em nenhum dos materiais são visíveis partículas individuais do plasma. Elas se apresentam como uma "massa" complexa dos diferentes minerais constituintes.

Como no Latossolo Roxo, o Latossolo Vermelho-escuro apresenta porosidade elevada, correspondendo grosso modo de 50% a 55% do fundo matricial; é também constituída principalmente por poros de empilhamento composto e, secundariamente, por canais e cavidades (intragregados).

Possui, entretanto, esqueleto mais abundante, que aqui representa cerca de 15% do fundo matricial. É formado principalmente por grãos de quartzo, em grande parte arredondados a subarredondados, de diversos tamanhos, e minerais escuros, todos englobados e distribuídos aleatoriamente no plasma dos agregados.

A distribuição relativa plasma e esqueleto é granular e porfirogrânica, como no caso anterior.

Apresenta, ainda, glébulas nodulares ferruginosas.

A análise mineralógica (raios X sobre amostra total - Fig. 25) mostra que se trata de material essencialmente caulinítico (caulinita parcialmente desordenada), com presença importante de hematita. A espectrometria por infravermelho (Fig. 26) confirma essas informações e indica ainda a presença de gibbsita (pouca).

Fig. 25: Difratoograma de raios X da fração argila do Latossolo Vermelho Escuro (Jazida 3)

Fig. 26: Espectro infravermelho do Latossolo Vermelho Escuro - amostra total

Tabela 19: Análises químicas pontuais (microsondagens) - Latossolo Vermelho-escuro
Resultados normalizados a 100%.

	PONTO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O
PLASMA VERMELHO ESCURO	02	43,24	29,40	21,66	4,78	0,17	0,37	0,22	0,16
	04	39,62	27,11	28,52	2,42	0,38	0,38	0,80	0,77
	06	39,56	29,06	25,62	4,40	0,33	0,41	0,40	0,22
	08	36,48	26,47	26,37	8,94	0,34	0,72	0,64	0,03
	09	45,89	27,09	20,68	4,82	0,45	0,56	0,45	0,08
	10	42,33	23,20	22,19	10,84	0,33	0,89	0,06	0,17
	11	39,52	25,21	25,01	8,83	0,04	0,41	0,81	0,17
	12	41,37	29,17	23,41	4,28	0,24	0,52	0,93	0,09
	15	45,33	26,82	22,90	3,47	0,44	0,75	0,21	0,08
PLASMA VERMELHO AMARELO	01	49,29	24,62	18,41	5,67	0,12	0,99	0,73	0,16
	03	57,51	21,74	14,92	2,58	0,15	1,73	1,08	0,31
	05	52,67	25,18	17,62	2,62	0,23	1,48	0,00	0,21
	07	48,79	24,68	19,81	5,14	0,00	0,52	0,79	0,27
	13	52,23	25,87	18,37	2,72	0,22	0,44	0,00	0,16
	14	48,19	23,96	22,37	3,47	0,32	0,94	0,57	0,18

Fig. 27: Diagrama triangular do sistema Fe_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 - Latossolo Vermelho Escuro

- 1 - plasma vermelho escuro
- 2 - plasma vermelho amarelo

Como para o LR, as sondagens químicas pontuais (Tabela 19) revelam que o plasma vermelho-amarelo é mais pobre em ferro e alumínio, ocupando o polo caulinítico (laterita caulinítica) do diagrama triangular de ALEVA (1979), Fig. 27.

1.2. O efeito da compactação nos Latossolos - LR e LE

O solo é constituído por três fases - sólida, líquida e gasosa - como mostra o esquema da Fig. 28, e a compactação tem como efeito imediato a modificação da proporção entre as diferentes fases que constituem os materiais, essencialmente a líquida e a gasosa. Os valores de densidade aparente seca (γ_d) e de porosidade total evidenciam essa modificação. Para facilitar a percepção desse fenômeno, foram calculados e representados graficamente (Fig. 29) os volumes ocupados pelas fases nos materiais indeformados e após a compactação (utilizando-se a mesma notação que aparece no esquema da Fig. 28).

Na Tabela 20 são apresentados os dados de densidade real, densidade aparente (fornecidos pelo DER-PR), porosidade e os outros índices físicos para o Latossolo Roxo e o Latossolo Vermelho-escuro, no seu estado indeformado (jazida) e compactado no teor ótimo para energia Proctor Normal, obtidos em laboratório.

Os resultados mostram que a compactação promoveu uma redução significativa da porosidade total para os dois solos: a porosidade do LR foi reduzida em aproximadamente 30% e a do LE em 40%.

Nos solos indeformados a fase líquida ocupava de 7% a 8% do volume dos vazios. A elevação do teor de umidade até atingir o ótimo Proctor e, ao mesmo tempo, a redução da porosidade nas amostras compactadas geram uma nova relação entre a fase líquida e a fase gasosa: mais de 90% do volume dos vazios passa a ser ocupado por líquido. Altera-se, também, a relação entre a fase líquida e a fase sólida, como mostram

PRANCHA II

MORFOLOGIA DOS SOLOS - EFEITO DA COMPACTAÇÃO

Foto 4: aspecto dos microagregados granulares (micronódulos - M) e da porosidade do Latossolo Roxo indeformado - MEV¹

Foto 6: organização do plasma do Latossolo Roxo após compactação. Os microagregados são parcialmente destruídos (M). Ocorrência de zonas de plasma orientado (PO)- MEV

Foto 5: aspecto dos microagregados granulares (M) e da porosidade do Latossolo Vermelho-escuro indeformado - MEV. Na foto observa-se grãos do esqueleto (E) englobados no plasma e isolados - MEV.

Foto 7: organização do plasma do Latossolo Vermelho-escuro após compactação. O plasma aparece fortemente orientado (PO) e com desenvolvimento de fissuras (F). Os microagregados desapareceram - MEV.

¹ MEV = microscopia eletrônica de varredura

Tabela 20: Características físico-hídricas dos solos indeformado e após compactação.

SOLO	CONDIÇÃO	γ_s	γ_d	W (%)	n (%)	e	S_r (%)	θ
Latossolo Roxo	Indeformado	3,023	1,050	4,54	65,0	1,88	7,2	0,13
	Compactado	3,023	1,644	26,00	45,6	0,84	93,9	0,78
Latossolo Vermelho-escuro	Indeformado	2,790	1,230	3,66	54,0	1,27	8,0	0,10
	Compactado	2,790	1,880	17,30	32,6	0,49	99,4	0,48

os índices de água e, conseqüentemente, as relações dos constituintes da fase sólida entre si. Estas condições implicam, segundo FAURE (1978), a redução do ângulo de atrito interno das partículas e o aumento da coesão (reações interparticulares da fase argilosa).

Essas mudanças estão impressas na macro e microestruturas dos materiais, como mostram as observações em microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura.

Comparando-se as Fotos 04 e 05 (Prancha II) dos solos naturais com aquelas dos solos indeformados (Fotos 04 e 05), verifica-se que ocorreu a redução do volume total de poros (macroporos) e uma transformação da porosidade interagregada original em porosidade cavitária e planar (fissuras). Como observou JIM (1986), quando os agregados são pressionados e fundidos, os vazios de empilhamento original são gradualmente deformados e tornam-se vazios planares e cavidades. As cavidades resultam da oclusão dos vazios de empilhamento quando do aumento da densidade global. Assim, a redução do volume total de poros implica, também, na mudança da forma dos vazios.

De acordo com GRIMALDI (1981), a porosidade interagregados decresce progressivamente sob a influência da compactação e teores em água crescentes para se tornar negligenciável ao teor de água do máximo Proctor. A porosidade intragregados, ao contrário, diminui fracamente, mas a distribuição do volume poral em função do tamanho

Fig. 28: Representação esquemática das fases constituintes do solo

Fig. 29: Efeito da compactação (teor ótimo de umidade Proctor) na distribuição volumétrica das fases sólida, líquida e gasosa constituintes dos solos:

LR = Latossolo Roxo indeformado

LR (comp) = Latossolo Roxo Compactado

LE = Latossolo Vermelho Escuro indeformado

LE (comp.) = Latossolo Vermelho Escuro compactado

de poros é modificada. A evolução do espaço poral resulta da deformação dos agregados, que é maior quanto mais elevado for o teor de água no momento da compactação, favorecida pelas propriedades lubrificantes da argila hidratada. Esta deformação pressupõe certas modificações na organização dos constituintes no interior dos agregados e, portanto, da morfologia do espaço poral intragregado. A porosidade resultante é predominantemente microscópica e ultramicroscópica.

A modificação da morfologia do espaço poral provoca mudanças nas propriedades hídricas do material, como a retenção de água e a permeabilidade, e no próprio comportamento da água (atividade potencial) e nas suas relações com a parte sólida.

Além do efeito imediato sobre a porosidade observa-se a transformação da trama (*fabric*) e da estrutura plásmica, principalmente pelo desenvolvimento de uma orientação paralela dos constituintes do plasma, em certas áreas, que confere ao material um aspecto "xistoso". O grau de transformação, face à mesma energia de compactação (Proctor Normal), entretanto, foi diferente num e noutro solo. No Latossolo Roxo (Foto 6) os micronódulos aparecem apenas parcialmente deformados, sendo possível identificá-los em alguns setores, envolvidos por material contínuo e mais orientado. A estrutura plásmica foi, em geral, menos afetada e apenas na proximidade das superfícies de contato entre os microagregados (área de coalescência) é que aparecem orientações plásmicas preferenciais (*stress-cutans*), como resultado dos esforços aí exercidos. No Latossolo Vermelho-escuro a transformação é mais acentuada (Foto 7), os microagregados praticamente desapareceram dando lugar a faixas maiores de plasma orientado. Em microscopia óptica se apresentam como orientações estriadas no plasma, desenhando uma rede em treliça, não muito densa nem contínua (aberta). Aparecem orientações plásmicas em torno de alguns grãos do esqueleto. A estrutura plásmica se define, desta forma, como in-bimassépica a granossépica. O material exhibe uma estrutura contínua com o desenvolvimento de fissuras muito finas, cujos traçados tendem a acompanhar o contato plasma/grãos do esqueleto. Os grãos do esqueleto também tendem a se distribuir segundo um padrão grosseiramente geométrico: os grãos aparecem agrupados em linhas paralelas e perpendiculares, englobados no plasma que se concentra no interior dos polígonos formados.

Conclui-se, portanto, que a compactação cria uma nova organização para o material que se caracteriza, principalmente, por modificações no espaço poral e na distribuição relativa entre as partículas constituintes do plasma e do plasma com o esqueleto. Por outro lado, as transformações na organização dos materiais impostas pela compactação dependem, para uma mesma energia, da natureza do material original. Tudo indica que as diferenças verificadas na forma e no aspecto dos microagregados, refletem diferenças de "resistência e estabilidade" face à manipulação. A redução maior da porosidade no Latossolo Vermelho-escuro pode ser explicada pela deformação maior e mais fácil dos seus microagregados. No Latossolo Roxo os microagregados estão menos deformados e parcialmente preservados, possibilitando a manutenção de parte da macroporosidade (agora na forma de cavidades).

2. MISTURAS ESTABILIZADAS

Em cada segmento foi amostrado um ponto da base, sempre no lado esquerdo, rodeio externo. Para a seleção do ponto levou-se em consideração: o bom estado da superfície de rolamento, a situação em plano e, sempre que possível, o distanciamento das estacas iniciais e finais de cada segmento.

- Localização dos pontos amostrados:

SCC/LR 1 - estaca 122

SCC/LR 2 - estaca 376

SCC/LE - estaca 1322

CCC - estaca 186

CC - estaca 1148

A constituição da base em cada ponto amostrado, de acordo com os dados do controle tecnológico fornecido pelo DER-PR, está representada no gráfico da Fig. 30. Os

volumes ocupados pela cal e pelo cimento foram obtidos a partir de cálculo, considerando-se os teores estipulados pelo projeto e os valores médios de peso específico encontrados na bibliografia:

- γ_s cimento = 3,20

- γ_s cal = 2,35.

Cada ponto apresenta relações volumétricas particulares entre as fases constituintes. Na Fig. 30, chama a atenção a diferença entre as bases SCC/LR 1 e SCC/LR 2 nos pontos amostrados: a SCC/LR 2 apresenta-se saturada (grau de saturação = 100%) e com densidade mais alta. Isto pressupõe uma organização diferenciada dos constituintes minerais e da porosidade para misturas, em princípio, semelhantes - Latossolo Roxo + 4% de cal + 5% de cimento.

Nas misturas com cascalho de basalto alterado a diferença entre as densidades alcançadas está relacionada, principalmente, com a diferença de energia de compactação: Proctor Normal no CCC e Proctor Intermediário no CC. A fase líquida no ponto da base CC está bem reduzida, muito aquém do ótimo Proctor, tendo 0,40 de Índice de água, contra 0,80 do CCC.

A fase líquida desempenha um importante papel durante a compactação, interferindo diretamente na reorganização do material e no seu comportamento:

- com teor de umidade acima do teor ótimo (ramo úmido da curva de compactação), como no SCC/LR 2, o material já atingiu o seu Limite de Liquidez e apresenta o máximo de compacidade (FAURE, 1978) - o grau de compactação do ponto amostrado é de 102%. A partir desse ponto o material é constituído teoricamente de uma mistura bifásica de sólido e água e o arranjo das partículas é o mais cerrado possível (GRIMALDI, 1981);

- com teores de umidade abaixo do teor ótimo (ramo seco da curva), de acordo com FAURE (1978, 1980), o material pode apresentar dois estados físicos diferentes. Com teores de umidade muito baixos, a partir de 0%, o material mostra-se pouco sensível ao esforço de compactação, que apenas é capaz de modificar o tamanho dos agregados. A partir de um determinado teor de umidade, entretanto, o material torna-se sensível à

Fig. 30: Relações volumétricas entre as fases constituintes das bases nos pontos amostrados:

Estaca 122 - SCC/LR 1
 Estaca 376 - SCC/LR 2
 Estaca 1322 - SCC/LE

Estaca 186 - CCC
 Estaca 1148 - CC

compactação e a densidade aumenta gradualmente, até atingir o seu máximo. Nesse ponto, que FAURE (1978) designou como "*ponto crítico de sensibilidade à compactação*", ocorre uma mudança de comportamento do material que corresponde à passagem da argila para o estado plástico. A partir daí diminui consideravelmente o ângulo de atrito das partículas, a argila se hidrata e desempenha um papel de lubrificante em relação aos grãos mais grosseiros (siltes e areias). Os agregados se deformam mais facilmente favorecendo um arranjo mais cerrado sob a ação do esforço mecânico. O autor correlacionou "*o ponto crítico*" ao Limite de Plasticidade - a partir dele, até o teor ótimo, o solo está no estado plástico. GRIMALDI (1981) mostra, ainda, que os efeitos da compactação realizada com baixas umidades são muito variáveis e dependem das características originais dos agregados.

Nestas misturas, por outro lado, os aditivos cal e cimento "consomem" nas reações que desencadeiam (hidratação e pozolânicas) parte da fase líquida. Assim, teores baixos de umidade, como no CC, podem resultar em prejuízo para as reações e, conseqüentemente, para a estabilização.

2.1. Características morfológicas das bases

Durante a coleta foi possível avaliar qualitativamente, através de observações visuais e táteis, as condições de homogeneidade da mistura, umidade, compactação e de fissuramento da base. Na cavidade aberta foram realizadas as medidas de espessura.

As observações de laboratório com o auxílio da lupa binocular sobre os fragmentos coletados, permitiram aprimorar aquelas realizadas na pista, principalmente com relação às diferenciações internas dos materiais das bases: arranjo, porosidade, cor, etc.

A seguir são apresentadas as descrições morfológicas (correspondentes aos níveis macro e mesoscópico) das bases nos pontos amostrados.

- SCC/LR 1

A base é constituída por uma mistura de Latossolo Roxo com 4% cal cálcica + 5% de cimento portland.

Apresenta, no ponto amostrado, 14cm de espessura. O grau de compactação é visivelmente variável ao longo da espessura da camada: do topo até 8cm de profundidade o material está super compactado e resistente; abaixo, apresenta-se mais poroso mas ainda compacto e no contato (1,5cm ou mais) com o subleito fica friável (solto).

O material da base se fragmenta em blocos prismáticos de base retangular, com 7 a 8cm de comprimento e 5 a 6cm de altura, com vértices e arestas vivas, faces recobertas por películas brancas. Os blocos maiores estão recortados por fissuras finas, paralelas e horizontais, que os subdividem em blocos mais estreitos (2cm de altura). Essas faces internas são planas, lisas e não apresentam as películas brancas. Cortam, indistintamente, as diferentes unidades de organização que o material apresenta.

A superfície da camada (topo) está recoberta por uma película branca espessa e contínua como se fosse uma crosta. Nas faces verticais esse revestimento é rarefeito, dissipado...

Nas faces não recobertas por películas (fissuras internas dos blocos maiores) é possível observar os arranjos do material e a distribuição dos aditivos: aparecem volumes arredondados submilimétricos a centimétricos, os menores bem arredondados e os maiores subarredondados a arredondados, vermelho-escuros, que se destacam em meio a um material mais claro e pontuado de branco. Os contatos entre os volumes arredondados e o material que os envolve são nítidos sem, contudo, apresentar obrigatoriamente uma descontinuidade física (fissura). No material mais claro os poros são visíveis.

Forçando-se com a ponta de um estilete, verificou-se que os volumes arredondados são menos resistentes que o material que os envolve.

Na parte central da camada, o material mais claro se apresenta mais poroso e aparece uma quantidade maior de volumes com formas subarredondadas.

Na porção inferior da camada dominam os volumes vermelho-escuros, que aqui são centimétricos, de formas irregulares e muito compactos. Apresentam faces lisas, provavelmente resultantes da orientação de argila, que se assemelham aos "slikensides" observados na Terra Roxa Estruturada. Em algumas dessas faces aparecem zonas com revestimento de película branca.

- SCC/LR 2

A base é composta por uma mistura de Latossolo Roxo + 4% de cal dolomítica + 5% de cimento portland.

Apresenta neste ponto 13cm de espessura, umidade alta (aparentemente acima do teor ótimo de compactação - com exsudação) e se fragmenta com maior facilidade do que a do ponto anterior. Encontra-se lamelada.

O topo da camada exhibe forte orientação do material, gerando lamelas finas, de espessuras milimétricas a submilimétricas, com faces alisadas, o que confere um aspecto "xistoso" ao material. Na parte central e inferior da camada essas lamelas finas desaparecem dando lugar a lamelas espessas, centimétricas, e a blocos subangulares de faces rugosas.

Neste material não são facilmente observáveis manchas ou pontuações brancas. Com o auxílio de lupa foi possível identificar, em alguns pontos, zonas estreitas de material mais claro envolvendo agregados de material de solo. Predomina, aparentemente, o material de solo sem indícios de aditivos.

- SCC/LE

A base é constituída pela mistura do Latossolo Vermelho-escuro com 2% de cal cálcica + 3% de cimento portland.

Apresenta no ponto amostrado 10cm de espessura, está aparentemente bem compacta, maciça e resistente (dificuldade para desmanchar) ao longo de toda a espessura da camada. Está cortada por fissuras horizontais paralelas e outras menores, irregulares e verticais, que individualizam blocos prismáticos de base retangular (de 1 a 2,5cm de altura), angulares, mais evidentes na parte superior e que desaparecem na parte inferior.

O topo da camada e as superfícies horizontais e paralelas, criadas pelo fissuramento, estão em geral recobertas por um depósito contínuo (película) de material branco, enquanto que as superfícies verticais apresentam esse recobrimento rarefeito e descontínuo.

São visíveis a olho nu manchas mais avermelhadas e escuras, de formas arredondadas (como nódulos) e de vários tamanhos (1 a 6mm), em meio a um material vermelho mais claro. Na porção central e na parte inferior da base os volumes vermelhos se apresentam em tamanhos maiores, podendo atingir até 1 mm. O material mais claro que engloba esses volumes é, também, mais poroso. Em alguns pontos, aparecem volumes brancos, milimétricos (1 a 2mm), arredondados, alguns visivelmente ocos.

- CC

Esta base de cascalho-cal, é constituída de fato por mistura de solo e cascalho de basalto alterado + 5% de cal dolomítica, apresentando 16 cm de espessura no ponto amostrado. O solo do subleito (Latossolo Roxo) foi incorporado ao cascalho de basalto

alterado quando da sua escarificação, em proporções variáveis, mas importantes. Uma peneiragem da amostra coletada, após esboroamento, indicou a presença de 25,5% de partículas de tamanho superior a 2mm, presentes no topo e na parte central da camada. Na parte inferior, esta fração grosseira corresponde a 14,5%.

Aparentemente apresenta-se mais compactada no topo e na parte central, até aproximadamente 10cm de profundidade, a partir daí parece menos compacta.

Este material se fragmenta em blocos angulares a subangulares com faces rugosas, mas na parte superior da base ocorrem lamelas.

O cascalho de basalto alterado se apresenta como fragmentos líticos escuros, com formas arredondadas a subarredondadas. Os maiores, com até 2,5cm de diâmetro, são numericamente poucos. No contato entre esses fragmentos e o material mais fino que os envolve (que aqui será denominado "matriz", à semelhança da matriz das rochas conglomeráticas) aparecem fissuras. Quando se retira o cascalho fica o seu molde evidenciado por superfícies alisadas na "matriz".

Aparecem, também, volumes avermelhados de solo, milimétricos e com fissuras finas internas.

O material mais fino ("matriz") que envolve o cascalho grosseiro e os volumes avermelhados de solo apresenta cor vermelho-amarelada.

Em toda a camada observam-se manchas esbranquiçadas (pontos de acúmulo de cal), fissuras paralelas, em geral seguindo os contatos entre a "matriz" e o cascalho.

- CCC

A base é constituída por Latossolo Roxo + cascalho de basalto alterado + 4% de cal cálcica + 5% de cimento. Apresenta-se no ponto amostrado com 14,5cm de espessura, bem resistente.

O cascalho de basalto alterado tem, aqui, formas mais poliédricas, angulares a subangulares. São aparentemente menos alterados do que no ponto anterior (CC), menos abundantes, porém com tamanhos maiores (com no máximo 3 e 4 cm de diâmetro).

Aparecem também os volumes arredondados de solo, avermelhados, com 1cm ou mais de comprimento e fissurados internamente. É frequente a ocorrência de fissuras no contato "matriz"/volumes vermelhos.

Neste material aparecem volumes brancos arredondados com aproximadamente 1cm de diâmetro e outros volumes menores (pontos), relativamente abundantes, dispersos. São nódulos carbonáticos (efervesce com HCl) resistentes.

Visualmente, na "matriz" desta base a contribuição do pó de basalto alterado é menor do que no caso anterior.

A base se fragmenta em blocos prismáticos de base retangular (de 1 a 3cm de altura), principalmente no topo da camada, e estas se fragmentam em blocos angulares. As faces estão recobertas por uma película branca descontínua. Em profundidade, os blocos são maiores e sem a presença marcante das películas brancas nas faces.

Junto à superfície do topo da camada é visível uma orientação do material, com aspecto de "xistosidade", ao longo de uma faixa de aproximadamente 1mm de espessura.

No topo, além das películas brancas ocorreu a penetração da imprimação ao longo das fissuras.

Para facilitar a comparação entre os segmentos elaborou-se a Tabela 21, onde estão sumarizadas as principais características das bases nos pontos amostrados.

A análise da tabela revela que em todos os pontos ocorrem problemas gerados na etapa de construção:

Tabela 21: Principais características das bases nos pontos amostrados - aspectos macromorfológicos.

PONTO	ESPESSURA	UMIDADE (pista)	COMPACTAÇÃO	UNIDADES ESTRUTURAIS	MATERIAIS E ORGANIZAÇÕES CARACTERÍSTICAS
SCC/LR 1 4% cal cálcica + 5% cimento	14 cm	normal - próxima do teor ótimo	grau de compactação diminui do topo (8 cm) para a base da camada	- blocos prismáticos de base retangular (7cmX5cm), angulares;	- material branco precipitado nas fissuras (película) horizontais interagregados; rarefeito nas verticais; pontos brancos; - volumes vermelho escuros, arredondados a subarredondados no topo; poliédricos, maiores, dominantes na parte inferior; - material vermelho mais claro, poroso, dominante no topo e raro na parte inferior.
SCC/LR 2 4% cal dolomítica + 5% cimento	13 cm	acima do teor ótimo exsudação	baixo grau de compactação	- topo - lamelas finas (milimétricas); - centro e parte inferior - lamelas espessas (centimétricas) e blocos subangulares.	- aspecto mais homogêneo; - estreita faixa de material mais claro envolvendo agregados (é difícil a distinção a olho nú)
SCC/LE 2% cal cálcica + 3% cimento	10 cm	baixa - material seco	uniforme em toda a espessura da base	- no topo - blocos prismáticos de base retangular (1 a 2,5 cm de altura); - as fissuras desaparecem na parte inferior	- material branco precipitado nas paredes das fissuras paralelas (película); recobrimento "rarefeito" nas fissuras verticais; volumes brancos arredondados (1 a 2 mm); - volumes vermelho escuros arredondados, menores no topo (1 a 6 mm) e maiores a partir da parte central (15 mm); - material vermelho claro envolvendo os volumes vermelho escuros.
CC 5% cal dolomítica	16 cm	baixa - material seco	o grau de compactação diminui do topo (6 cm) para a base da camada	- topo - lamelas; - centro e parte inferior - blocos angulares a subangulares.	- manchas esbranquiçadas, pontos brancos; - fragmentos líticos (basalto); - volumes de material de solo (LR) vermelho escuros; - "matriz" vermelho amarelada (solo + pó de basalto alterado).
CCC (4% cal cálcica + 5% cimento)	14,5 cm	normal - próxima do teor ótimo	uniforme	- topo - blocos prismáticos de base retangular (1 a 3 cm de altura), angulares; - centro e parte inferior - blocos maiores.	- películas brancas descontínuas nas faces das lamelas do topo da camada, mais raras na parte inferior; volumes brancos arredondados (até 1 cm), abundantes; - fragmentos líticos (basalto) - menos alterados, maiores e em menor número que no CC; - volumes vermelho escuros (solo - LR), arredondados (1 cm); - "matriz", com menos pó de basalto alterado que o CC.

- espessura fora dos limites aceitáveis (3 pontos muito abaixo da estipulada em projeto - 15cm);
- grau de compactação variável ao longo da espessura da camada (SCC/LR 1 e CC) ou baixo grau de compactação (SCC/LR 2);
- mistura dos aditivos deficiente - concentrações pontuais, principalmente no CCC;
- umidade muito acima (SCC/LR 2) ou muito abaixo (CC) do teor ótimo de compactação.

Problemas com a espessura e com a compactação podem comprometer diretamente o comportamento estrutural da pista.

O teor de umidade, por outro lado, afeta o grau de compactação e as reações com os aditivos. Como a amostragem foi realizada vários anos depois de construída a estrada, o teor de umidade observado poderia não corresponder exatamente àquele da época da construção. Contudo, verificou-se que a observação visual e tátil realizada durante a coleta de amostras coincide com os dados fornecidos pelo controle tecnológico do DER-PR (Fig. 30), efetuado logo após a construção.

Em quatro pontos foram observadas películas de material branco revestindo superfícies horizontais (fissuras ou superfície de topo), principalmente na parte superior da camada. As fissuras recobertas por películas brancas, foram formadas provavelmente em um período logo após a construção, quando a água existente no material encontrava-se saturada com os aditivos. A localização (topo da camada) e morfologia das películas brancas de recobrimento (revestimento de fissuras horizontais) indicam que estas se formaram a partir da ascensão de soluções ricas em aditivos, por efeito de evaporação. Este fato mostra que a imprimação da base, feita para impermeabilizá-la, não foi capaz de evitar perdas de umidade.

De um modo geral observa-se, também, que a parte superior da camada apresenta-se sempre mais fissurada, dando origem a lamelas e blocos prismáticos de base retangular estreitos (1 a 3cm de altura), enquanto que na parte central e na inferior

formam-se blocos poliédricos maiores angulares e subangulares.

O caso mais sério, com formação de lamelas muito finas e pequenas, ocorre no ponto do SCC/LR 2, e pode levar à desagregação da parte superior da base. No ponto do CC, este problema também ocorre, mas em menor grau.

As misturas nos segmentos com base de solo-cal-cimento apresentam uma organização característica: agregados de material do solo original envolvidos por zonas mais estreitas ou mais largas (dependendo do ponto considerado e o nível da base - topo, centro e parte inferior), de material mais claro, mais poroso, nitidamente mais resistente, que corresponde ao material de solo intimamente associado aos aditivos.

Nas misturas com cascalho de basalto alterado, identifica-se os fragmentos de basalto, agregados de material do solo do subleito e uma "matriz" composta por solo, pó de basalto alterado e aditivos - "matriz mista" -, que permeia as outras unidades.

As películas, manchas e pontos de concentração de material esbranquiçado aparecem como feições especiais relacionadas às fissuras - películas - ou dispersas no material das misturas, sejam elas com solos ou com cascalho.

Com o objetivo de se obter informações sobre a estabilidade das misturas, vários fragmentos das misturas foram imersos em água:

- os fragmentos dos segmentos SCC/LR 1, SCC/LE e CCC se mantiveram firmes, intactos mesmo após vários dias de imersão. Apenas as partículas (poucas) soltas nas superfícies das fraturas dos fragmentos é que foram deslocadas. A água se manteve límpida. Pressionados com um bastão de vidro, os fragmentos não se romperam;

- no ponto CC, os fragmentos da parte superior da camada se mantiveram intactos e não se romperam com a pressão do bastão. Os fragmentos da parte inferior da camada se desmacharam em alguns minutos de contato com a água, turvando-a ligeiramente;

- os fragmentos do ponto SCC/LR 2 se mantiveram intactos, mas muitas partículas das superfícies das fraturas se soltaram. Pressionados com o bastão,

romperam-se em vários fragmentos menores. A água, também neste caso, ficou ligeiramente turva.

2.2. Características geoquímicas: solos naturais e misturas

As amostras coletadas dos materiais das bases (misturas) e dos solos naturais foram submetidas à análise química total (ataque triácido). A partir dos dados obtidos foi possível verificar:

- as diferenças químicas entre os dois solos (LE e LR) empregados e as misturas;
- os teores de aditivos (cal + cimento) efetivamente aplicados;
- o comportamento dos principais constituintes químicos nos materiais estabilizados;
- e a natureza química das contribuições do cascalho de basalto alterado incorporado à "matriz" fina nas bases de cascalho-cal-cimento.

Na Tabela 22 estão relacionados os dados químicos obtidos na forma de óxidos.

Tanto o Latossolo Roxo (LR) como o Latossolo Vermelho-escuro (LE) empregados nas misturas estabilizadas apresentam uma composição química caracterizada pela concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio em relação à sílica, concentração de titânio e baixos teores em bases. Apresentam, em consequência disso, razões K_i e K_r baixas, inferiores a 2, características dos solos ferralíticos ou "lateríticos" (ROBINSON, 1949; AUBERT, 1965; AUBERT & SEGALIN, 1966).

No diagrama triangular $SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3$ (Figs. 24 e 27), como foi visto anteriormente, situam-se dentro do campo das lateritas, porém mais próximos do pólo caulínítico.

Tabela 22: Análise química total dos solos e das misturas - ataque triácido

ÓXIDOS %	SOLOS (Jazidas)		BASES SOLO-CAL-CIMENTO			BASES COM CASCALHO	
	LE	LR	SCC/LE	SCC/LR 1	SCC/LR 2	CC	CCC
SiO ₂	19,75	27,40	17,90	24,35	26,35	24,85	26,30
Al ₂ O ₃	17,30	25,50	14,25	20,80	23,00	18,50	20,00
Fe ₂ O ₃	15,75	27,50	12,50	22,75	25,00	23,20	22,50
TiO ₂	3,45	5,30	2,95	4,45	4,95	4,50	4,35
MnO ₂	0,09	0,26	0,10	0,23	0,24	0,42	0,27
SO ₃	0,07	0,15	0,10	0,34	0,19	0,12	0,29
CaO	0,04	0,04	3,90	8,40	2,60	3,60	5,10
MgO	0,11	0,14	1,07	0,68	1,18	2,70	1,95
K ₂ O	0,04	0,05	0,07	0,10	0,09	0,20	0,25
Na ₂ O	0,06	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04
P.F. 1000°C	7,20	10,70	9,50	13,50	12,20	12,20	12,90
Resíduo Insolúvel	36,20	2,75	36,45	2,60	2,60	8,10	4,80
TOTAL	100,06	99,82	98,83	98,23	98,43	98,42	98,75
H ₂ O	1,37	1,90	1,82	3,25	2,33	3,40	3,19

É importante salientar que estes solos podem se apresentar mais dessilicificados e com uma individualização maior dos óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro. É o que se constata quando se comparam os dados químicos do Latossolo Roxo da área de Santa Mariana (PR) com os resultados obtidos por CARVALHO et al (1983) para um Latossolo Roxo da região de Ribeirão Preto (SP). Apesar de se tratar do mesmo grupo de solos, podem ocorrer, dentro de determinados limites, variações na composição química e, conseqüentemente, na composição mineralógica. Assim, na amostra de Ribeirão Preto a presença de hidróxidos de alumínio individualizados (gibbsita) é maior e caracteriza a fração argila. No LR de Santa Mariana a fração argila é marcada pela dominância da caulinita. Este fato pode significar uma reatividade diferente para cada amostra frente aos aditivos, como foi observado por NÓBREGA (1988).

A análise química revela ainda que o LE apresenta um resíduo insolúvel elevado comparado ao LR. Como a análise foi realizada sobre a amostra total, esse teor corresponde à fração areia, que nesta amostra é de cerca de 37% e é essencialmente constituída por grãos de quartzo. Para o LR este teor é baixo (2,65%) refletindo também os baixos teores da fração areia, aqui constituída principalmente por minerais escuros (ilmenita, magnetita) e pouco quartzo.

Para as misturas solo-cal-cimento observa-se que os teores de resíduo insolúvel são semelhantes àqueles apresentados pelos solos naturais empregados: o SCC/LE repete o valor obtido para o LE; o mesmo acontece para o SCC/LR 2 e SCC/LR 1 que apresentam teores muito próximos ao do LR.

Este fato indica que os produtos de hidratação do cimento e os de reação pozolânica são também afetados pelo ataque triácido. Assim, todo o CaO adicionado, tanto na forma de cal como de cimento, é recuperado (dosado), o que possibilita a verificação dos teores de aditivos efetivamente aplicados.

Como os solos empregados nas misturas apresentam teores muito baixos de CaO e MgO, a elevação desses teores nos materiais estabilizados das bases solo-cal-cimento está, portanto, diretamente relacionada aos aditivos: o CaO é o constituinte químico principal da cal hidratada e do cimento portland; o MgO está presente na cal hidratada

cálcica e principalmente na cal hidratada dolomítica.

Considerando-se a análise química total da cal empregada (dados fornecidos pelo DER-PR e apresentados na Tabela 9 - Capítulo 3) e a composição média do cimento portland é possível calcular aproximadamente os teores de CaO teoricamente aplicados:

- 4% de cal cálcica + 5% de cimento → 5,4% de CaO
- 2% de cal cálcica + 3% de cimento → 3,0% de CaO
- 5% de cal dolomítica → 2,02% de CaO e 1,37% de MgO
- 4% de cal dolomítica + 5% de cimento → 4,6% de CaO e 1,15% de MgO.

Esses valores podem variar em torno de 1% para menos, principalmente em função da variação da composição química da cal.

Com base na composição química da cal e do cimento fez-se o cálculo dos teores de CaO e de MgO contidos nas porcentagens estipuladas pelo projeto. A comparação desses teores com aqueles dosados (Tabela 22) mostra discrepâncias:

- para o trecho SCC/LE, os teores dosados indicam uma aplicação de 6,5% de aditivos, 1,5% a mais daquele indicado no projeto;

- para o trecho SCC/LR 2, o teor dosado de CaO é muito inferior ao do projeto, cerca de 2%. Como neste trecho foi empregada cal dolomítica, observa-se, pelo teor de MgO existente na amostra, que a porcentagem de cal detectada corresponde àquela estipulada; a deficiência constatada diz respeito ao teor de cimento - ao invés de 5% os resultados químicos indicam 3%;

- para o trecho SCC/LR 1, o CaO dosado excede em 3% aquele calculado. Aqui é difícil afirmar se o excesso corresponde à cal ou ao cimento;

- para as bases com cascalho, no CCC o teor de CaO dosado está muito próximo daquele indicado. Para o CC, tanto o teor de CaO como o de MgO estão muito acima do previsto. Neste ponto, de acordo com os teores dosados, teriam sido adicionados 9% de cal dolomítica. Convém observar que nesses dois segmentos pode haver uma contribuição, tanto em termos de CaO como de MgO (principalmente deste), do pó de

cascalho de basalto alterado incorporado à "matriz".

A incorporação do cálcio e do magnésio nos materiais das bases muda as proporções relativas dos outros constituintes. Para facilitar a análise das novas composições químicas obtidas e do comportamento dos elementos, determinaram-se as razões entre o cálcio e todos os outros constituintes dos solos. Os dados químicos, originalmente expressos na forma de óxidos, foram convertidos em porcentagens de elementos e compararam-se as razões cálcio/elemento (Ca/Si, Ca/Al, Ca/Fe, Ca/Ti, Ca/Mg, Ca/K) com os teores de Ca (%) existentes nas amostras.

Os gráficos (Fig. 31) indicam uma variação crescente das razões em função do aumento do teor de cálcio. As misturas realizadas com o LR aparecem alinhadas de forma crescente ao longo da reta. Afastada desta, aparece apenas a mistura com o LE, para todos os elementos, mostrando claramente a sua composição química diferente. Fica evidente que os teores originais de silício, alumínio, ferro e titânio se mantêm proporcionalmente em todas as misturas. O mesmo não acontece para as razões Ca/Mg e Ca/K. Para estes elementos os pontos se dispersam, mostrando que as proporções estão alteradas.

O magnésio é adicionado com a cal e em quantidades variáveis, dependendo da natureza química desta. Segundo o projeto da pista experimental, apenas os segmentos SCC/LR 2 e CC teriam sido tratados com cal dolomítica. Pelos dados obtidos, a cal aplicada ao segmento SCC/LE também apresenta teores relativamente elevados de magnésio. Assim, é possível afirmar que para as bases solo-cal-cimento, somente a cal aplicada no segmento SCC/LR 1 é realmente cálcica. Para as bases cascalho-cal e cascalho-cal-cimento, além da possível contribuição da cal, o Mg é fornecido também pelo cascalho de basalto alterado. A amostra do segmento CC é a que apresenta os teores mais elevados (razão Ca/Mg mais baixa). O MgO corresponde a 42,85% da soma CaO + MgO, o que não poderia ser fornecido apenas pela cal. No segmento CCC, o MgO corresponde a 27% da soma, mas aqui foi empregada cal cálcica, o que não justifica teores acima de 8%.

Com relação ao potássio, observa-se que existe um alinhamento dos pontos das

Fig. 31: Variação das razões Ca/Elementos químicos (principais) em relação ao teor de cálcio.

1 = SCC/LE

2 = CC

3 = SCC/LR 2

4 = CCC

5 = SCC/LR 1

misturas solo-cal-cimento ao longo da reta, com o afastamento do SCC/LE. Mas as amostras das bases solo-cascalho-cal-cimento estão dispostas fora dessa tendência, mostrando claramente um aumento nas proporções deste elemento nas misturas e, aqui, como contribuição exclusiva do basalto alterado.

Outro fato a ser ressaltado é que a Perda ao Fogo é sempre maior nos materiais estabilizados. Este aumento está relacionado à presença de carbonatos e dos novos minerais hidratados produzidos pela hidratação do cimento e pelas reações pozolânicas.

Como já foi observado anteriormente, a composição química das misturas, com ou sem o cascalho de basalto alterado, não se altera significativamente para os elementos maiores: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 . Entretanto, verifica-se um enriquecimento significativo em MgO e K_2O nas misturas com o cascalho de basalto alterado. O aumento do MgO e K_2O pode ser oriundo de fases secundárias (esmectitas em geral - celadonita, saponita, nontronita -, illita e materiais amorfos) resultantes da alteração dos minerais ferro-magnesianos (olivinas, piroxênios), plagioclásios e do vidro vulcânico. Mais evidente no CC e "mascarado" no CCC, é possível supor uma contribuição do cascalho de basalto alterado também no teor de CaO .

Por outro lado, os índices K_i das misturas solo-cal-cimento, realizadas com o Latossolo Roxo, são apenas ligeiramente mais elevados que a do solo original: de 1,82 passam para 1,94 e 1,98. Entretanto, naquelas em que o basalto alterado foi incorporado os valores do K_i são mais elevados, atingindo 2,23 e 2,28. Este último valor foi obtido para a amostra CC, onde o cimento não foi adicionado. O mesmo se verifica para os valores do K_r . Estes índices mostram que nas misturas cascalho-cal e cascalho-cal-cimento há também um aumento do SiO_2 como contribuição do cascalho de basalto alterado.

Nas bases de cascalho-cal e cascalho-cal-cimento, o resíduo insolúvel é maior do que aquele do LR incorporado nas misturas. Embora o ataque tenha sido efetuado apenas sobre a fração $<2,00\text{mm}$ de diâmetro (finamente moída), uma parte do cascalho de basalto alterado é triturada durante a execução das bases, e incorporada a esta fração. Minerais primários (grãos de feldspatos, algum quartzo, minerais opacos, etc.)

resistentes ao ataque vão aumentar o resíduo. O material da base CC apresentou o dobro do resíduo insolúvel em comparação com aquele da base CCC. Na análise macro e mesomorfológica observou-se que o primeiro apresenta o cascalho de basalto mais alterado que o segundo e, portanto, mais facilmente triturado, o que possibilita uma incorporação maior deste material à "matriz mista". Os dados do resíduo insolúvel comprovam, em parte, esta maior contribuição.

Nas amostras de dois segmentos de pista, uma base solo-cal-cimento (SCC/LR 1) e outra cascalho-cal-cimento (CCC), foram separados manualmente os diferentes materiais identificados macroscopicamente: o material esbranquiçado que ocorre como pontos, manchas e películas brancas; o material vermelho mais claro e poroso; o material vermelho mais escuro e denso.

Os resultados obtidos na análise química total (ataque triácido) são apresentados na Tabela 23. Esses materiais se diferenciam principalmente pelo conteúdo de CaO, como pode ser observado. É bem marcado para o CCC, que apresenta um aumento crescente do teor de CaO nos três materiais. Para o SCC/LR 1, esse aumento não é gradual: o material esbranquiçado e o material vermelho mais claro e poroso apresentam teores semelhantes.

Os teores de Mg são maiores no CCC. As quantidades deste elemento crescem à medida que aumenta o Ca. Fica claro aqui que a cal aplicada também contém uma quantidade importante de magnésio. Para o SCC/LR 1 os teores se elevam ligeiramente em relação ao solo original e, de forma crescente, acompanhando o teor de Ca. Também para o K fica evidente a concentração maior na amostra com cascalho de basalto alterado, principalmente na "matriz" (onde há a maior incorporação do basalto alterado, triturado). Para o SCC/LR 1 os teores são relativamente constantes em todas as organizações.

Os dados de Perda ao Fogo também são significativos, acompanhando o teor de CaO. Refletem, portanto, a presença das novas fases engendradas no processo de estabilização, que podem ser carbonatos, cristalizados *in situ* ou oriundos de carbonatação prévia da cal, e silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

Tabela 23: Análise química total das diferentes organizações e materiais identificados nas misturas - ataque triácido.

ÓXIDOS (%)	SOLO	BASE SOLO-CAL-CIMENTO SCC/LR 1			BASE CASCALHO-CAL-CIMENTO CCC		
	LR	a	b	c	a	b	c
SiO ₂	27,40	23,10	23,20	25,15	23,75	27,20	26,70
Al ₂ O ₃	25,50	19,80	20,00	22,80	18,00	18,20	21,50
Fe ₂ O ₃	27,50	22,50	23,40	26,00	21,80	22,00	25,50
TiO ₂	5,30	4,70	4,32	4,90	4,30	4,05	4,95
MnO ₂	0,26	0,26	0,25	0,26	0,26	0,32	0,28
CaO	0,04	9,35	9,30	4,50	7,90	5,40	2,77
MgO	0,14	0,82	0,80	0,38	3,25	2,23	0,84
K ₂ O	0,05	0,12	0,11	0,12	0,21	0,43	0,19
Na ₂ O	0,03	0,26	0,28	0,07	0,15	0,04	0,03
P.F. 1000°C	10,70	16,55	15,40	13,26	15,70	13,85	12,50
Resíduo Insolúvel	2,75	3,10	2,70	2,70	5,15	5,60	4,05
TOTAL	99,67	100,56	99,76	100,14	100,47	99,32	99,31
H ₂ O	1,90	2,75	2,25	1,67	2,00	2,04	1,71

Base solo-cal-cimento:

- a = películas, manchas e pontos brancos
- b = plasma vermelho mais claro, poroso
- c = plasma vermelho-escuro

Base cascalho-cal-cimento:

- a = películas, manchas e pontos brancos
- b = "matriz mista"
- c = volumes de material do solo (plasma vermelho-escuro)

Estes dados revelam que o conteúdo químico das amostras não é exatamente o mesmo para todos os tipos de materiais e organizações que as misturas apresentam. Cada material e organização interna identificada tem uma composição química particular, gerada por concentrações de aditivos e as inter-reações destes, em diferentes graus, com os materiais naturais empregados:

- o material esbranquiçado, rico em CaO e mais pobre nos outros elementos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , resulta da concentração dos aditivos, em particular da cal, seja como revestimento de superfícies (o que pressupõe migração de soluções), seja como pontos de acúmulo conseqüentes de falhas na homogeneização da mistura;
- o material vermelho mais claro, poroso, ainda rico em CaO e com teores mais elevados de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 que o primeiro, resulta da interação dos aditivos, solo e basalto alterado triturado (quando este está presente na mistura);
- o material vermelho-escuro, denso, que se destaca como volumes arredondados ou irregulares, apresenta teores de CaO ainda superiores ao material original, mas os outros elementos estão presentes em proporções mais próximas àsquelas do material original. Nesta organização os materiais estão menos afetados pela atuação dos aditivos.

2.3. Mineralogia

A composição química diferenciada das organizações e materiais gerados nas misturas pressupõe, conseqüentemente, uma mineralogia específica. Entretanto, a natureza dos minerais produzidos e das reações dos aditivos com os materiais naturais torna problemática a sua identificação mineralógica.

A mineralogia dos solos, em particular a da fração argila, é tradicionalmente

determinada pela difração de raios X. Esta técnica também tem sido utilizada para a determinação dos produtos de reação pozolânica da cal e os de hidratação do cimento.

TAYLOR (1964), TURRIZIANI (1964), COPELAND & KANTRO (1964) relacionam vários silicatos, aluminatos, aluminossilicatos, carboaluminossilicatos e sulfoaluminatos de cálcio hidratados resultantes da hidratação do cimento, determinados por difração de raios X. Contudo, HENNING (1974) ressalta que a detecção qualitativa de um composto em particular é muito difícil, já que esses hidratos têm propriedades similares. No caso específico dos produtos de hidratação do cimento, segundo este autor, a hidratação simultânea das quatro fases (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF) geralmente presentes resulta em intercrescimento íntimo de vários hidratos, cuja cristalinidade é variável e muda com o tempo. Assim, recomenda-se que a determinação mineralógica dos novos compostos seja realizada empregando-se mais de uma técnica.

A dificuldade de reconhecimento das fases neoformadas, mesmo em amostras com alta concentração de aditivos como é o caso das "pastas de cimento" e concreto, é ainda maior em amostras de solos estabilizados. Aqui, os teores de aditivos são relativamente baixos e os produtos de reação não se apresentam em quantidades suficientes para serem detectados. A este fato, soma-se o baixo grau de cristalinidade que apresentam e a possibilidade de superposição das raia por aquelas dos constituintes mineralógicos do solo: argilas, óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro.

Considerando-se os problemas levantados, optou-se por realizar as determinações mineralógicas por difratometria de raios X diretamente sobre os diferentes materiais e organizações, separados manualmente. Para complementar empregou-se também a espectrometria infravermelho.

Para facilitar a interpretação, os difratogramas obtidos dos diferentes materiais e organizações de cada mistura foram superpostos, tendo na base o difratograma do solo original empregado. Eles estão identificados através de letras:

a - películas, pontos e manchas brancas;

b - material vermelho mais claro (bases solo-cal-cimento) e a "matriz mista" (bases com cascalho de basalto);

c - material vermelho-escuro.

Procedeu-se da mesma forma para a interpretação dos espectros infravermelhos.

No casos das amostras das bases SCC/LR 2 e CC não foi possível obter quantidades suficientes de películas e pontos brancos (a) para as análises.

- Bases solo-cal-cimento

Analizando-se os difratogramas das Figuras 32 a 34, verifica-se, independentemente do material original (LR ou LE), que:

- nas três organizações (a, b, c) aparece o carbonato de cálcio (calcita), mas em concentrações e graus de cristalinidade decrescentes do material (a) para o (c). No material (a), este carbonato está bem cristalizado, apresentando os seus picos característicos 3,86 - 3,03 - 2,49 - 2,28 - 2,09 - 1,91 - 1,87 Å. Nos materiais (b) e (c) apenas o pico a 3,03 se mantém, enquanto que o pico a 3,86 é apenas sugerido ou desaparece, e os outros diminuem ou adquirem a forma de banda;

- nos materiais (a) e (b), mas principalmente no (b), observa-se a presença de outros picos, 9,82 e 5,60 (SCC/LR 1 a), 9,72 e 5,59 (SCC/LE a), que podem indicar a presença de silicatos de cálcio hidratados do tipo C-S-H(II) ou ainda a ettringita (trissulfoaluminato cálcico hidratado - $C_3A \cdot 3SO_4Ca \cdot 32H_2O$) que possui picos a 9,73 - 5,61 e 3,88 Å. O pico a 2,88 pode indicar a presença de aluminatos tetracálcicos (βC_2AH_8). Evidências da ocorrência do composto de Stratling (C_2ASH_8) são dadas pelos picos 4,18 - 2,87 - 2,48 - 1,66, embora o pico a 12,58 não apareça claramente. No material (a) da base SCC/LR 1 há indícios da presença de C_3AH_6 (picos a 2,81 - 2,30 - 2,04) principalmente em função do pico a 2,04;

Fig. 32: Difrátogramas de raios X das diferentes organizações e materiais identificados na mistura da base SCC/LR 1.

Fig. 33: Difrátogramas de raios X das diferentes organizações e materiais identificados na mistura da base SCC/LR 2.

Fig. 34: Difractogramas de raios X das diferentes organizações e materiais identificados na mistura da base SCC/LE.

- ocorre um aumento crescente do grau de desordem da caulinita, do material (c) para o material (a). O pico a $7,15$ vai se reduzindo e a base se alargando de um material (organização) para outro, o mesmo ocorrendo com os picos de outras ordens.

No caso das bases onde foi empregado o LR, observa-se que a gibbsita, já pouco expressiva no material original, praticamente desaparece no material estabilizado da base SCC/LR 1, enquanto que na base SCC/LR 2 (Fig. 33) ela se mantém.

É interessante notar que o material da base SCC/LR 2 (onde foi empregada a cal dolomítica) é o que globalmente apresenta menores diferenças entre os materiais da mistura e o solo original - tanto a gibbsita quanto a caulinita estão mais preservadas.

A análise mineralógica por espectrometria infravermelho evidencia mais claramente as alterações sofridas pela caulinita e gibbsita (no caso do LR) e confirma a presença de novas fases minerais nas organizações (a) e (b).

Nas Figuras 35 e 36 é possível comparar os efeitos apresentados pelas misturas SCC/LR 1 e SCC/LR 2. É evidente a diferença de reação num e noutro caso:

- a mistura SCC/LR 1 apresenta variações significativas de absorção na faixa 3.700 a 3.400cm^{-1} (região onde ocorre as vibrações de estiramento do grupo OH). As bandas originais da caulinita aparecem ligeiramente alteradas na forma e na intensidade, principalmente a 3.650cm^{-1} . Novas bandas de absorção, embora pequenas, surgem entre 3.680 e 3.665cm^{-1} , o que pode significar a presença de produtos hidratados, provavelmente aluminatos de cálcico do tipo C3AH6 (HENNING, 1974). Uma banda a 3.647cm^{-1} e outra a 3.602cm^{-1} , na organização (b), é indicativa da presença de silicatos de cálcio hidratados semelhantes à tobermorita sintética (HENNING, 1974). Outras variações importantes ocorrem na faixa entre 3.600 e 3.400cm^{-1} , criando alterações nas bandas de absorção da gibbsita, aumentando-as significativamente. Nesta região, segundo HENNING (1974), ocorre a absorção dos aluminatos di, tri e tetracálcicos hidratados. É também a região de absorção da sílica hidratada amorfa e da alumina, com o

Fig. 35: Espectro infravermelho do material da base SCC/LR 1

a) películas, manchas e pontos brancos

b) plasma vermelho claro

c) plasma vermelho escuro

LR - Latossolo Roxo

Fig. 36: Espectro infravermelho do material da base SCC/LR 2
b) plasma vermelho claro c) plasma vermelho escuro LR - Latossolo Roxo

máximo próximo a 3.500cm^{-1} . A intensidade de absorção depende grandemente do teor de alumina (FARMER & PALMIERI, 1975). Na região de absorção composta envolvendo vibrações Al-O-Si e Si-O-Si, entre 1.100 e 900cm^{-1} , as variações são menos evidentes, salvo no caso da intensidade da banda de absorção da caulinita a 935cm^{-1} que diminui progressivamente da organização (c) para a (a). Na região de absorção entre 1.800 e 400cm^{-1} a modificação mais importante é o aparecimento progressivo de novas bandas, uma a 1.450 e outra a 875cm^{-1} , referentes a carbonatos de cálcio. O máximo de intensidade destas bandas aparece no material (a), como também se verificou com a difração de raios X;

- o material SCC/LE (Fig. 37) apresenta os mesmos tipos de alteração que o SCC/LR 1 e, em alguns casos, os indícios são mais evidentes;
- o material SCC/LR 2 (Fig. 36), ao contrário, apresenta apenas pequenas variações, como a redução na intensidade das bandas a 3.650 e 3.620cm^{-1} da caulinita, principalmente na organização (b). Aparecem também os indícios da presença de carbonatos, muito menos evidentes do que aqueles apresentados pelo SCC/LR 1.

- Bases com cascalho

Nas misturas com cascalho de basalto alterado os problemas de identificação mineralógica por raios X são ainda maiores. A "matriz mista" dessas misturas, além do solo e aditivos, incorpora o pó de basalto alterado, cuja mineralogia pode ser variada.

Na "matriz", como se pode observar nos difratogramas das Figs. 38 e 39, aparecem as raia da caulinita, hematita, quartzo, magnetita e ilmenita; são os minerais existentes no material do solo incorporado (LR) e que também podem estar compondo o pó alterado do basalto. Aparecem, ainda, uma série de novas raia, pequenas, que indicam a presença de restos não alterados de plagioclásios e piroxênios. A superposição maior de raia torna impossível a identificação de produtos neoformados a partir dos aditivos.

Fig. 37: Espectro infravermelho do material da base SCC/LE.

a) películas, manchas e pontos brancos

b) plasma vermelho-claro

c) plasma vermelho-escuro

LE - Latossolo Vermelho-Escuro

Fig. 38: Difratomogramas de raios X das diferentes organizações e materiais identificados na mistura da base CC.

Fig. 39: Difratomogramas de raios X das diferentes organizações e materiais identificados na mistura da base CCC.

Entretanto, regista-se claramente a presença de carbonato de cálcio (calcita) no material (c) e, em maiores quantidades, nos materiais (b) e (a). Da mesma forma que nas bases solo-cal-cimento, a caulinita dos materiais (b) e (a) apresenta indícios de cristalinidade mais baixa.

Nos espectros infravermelhos a situação se repete:

- nas misturas CC e CCC (Figs. 40 e 41) as alterações também aparecem promovendo mudanças de forma e intensidade das bandas referentes a 3.650 e 3.620cm^{-1} . Para a mistura CCC as alterações são mais evidentes e diversificadas. Novas bandas surgem nas organizações (c) e (b) e podem estar relacionadas tanto com os materiais incorporados do basalto alterado quanto aos produtos de reação.

O carbonato de cálcio foi detectado nas organizações (a) e (b) do CCC e (b) do CC.

As observações morfológicas das misturas realizadas a níveis macro e mesoscópicos, bem como as análises químicas (ataque triácido) e mineralógicas (raios X e infravermelho) revelaram que:

- as misturas estabilizadas apresentam aspectos morfológicos distintos daqueles dos solos originais. Estes resultam da incorporação de novos constituintes - os aditivos - e de reorganizações do material do solo promovidas tanto pelas reações com a cal e o cimento quanto pelas condições de construção da base (homogeneização da mistura, teor de umidade e compactação);
- as misturas solo-cal-cimento apresentam como organizações morfológicas principais: a) películas (esta organização é mais rara na mistura com cal dolomítica), manchas e pontos de material esbranquiçado; b) material vermelho mais claro e mais poroso; c) material vermelho-escuro mais denso e que geralmente aparece como volumes arredondados ou irregulares bem definidos;

Fig. 40: Espectro infravermelho do material da base CC.

b) "matriz mista"

c) volumes vermelho escuros

LR - Latossolo Roxo

Fig. 41: Espectro infravermelho do material da base CCC.

a) películas, manchas e pontos brancos

b) "matriz mista"

c) volumes vermelho escuros

LR - Latossolo Roxo

- as misturas cascalho-cal e cascalho-cal-cimento apresentam como organizações morfológicas principais: a) películas (organização mais rara na mistura com cal dolomítica), manchas e pontos de material esbranquiçado; b) uma "matriz"

vermelho-amarelada porosa; c) volumes bem definidos de material vermelho-escuro; d) fragmentos líticos de basalto;

- cada organização identificada nos níveis macro e mesoscópicos é constituída por materiais química e mineralógicamente diferenciados. A diferença básica está no teor de cálcio: é maior no material das películas, manchas e pontos esbranquiçados, menor no material vermelho-escuro e apresenta teores intermediários no material vermelho mais claro. Em termos mineralógicos, a variação do teor de cálcio, aparece refletida na presença maior ou menor de novos constituintes: carbonato de cálcio (calcita, mesmo nas misturas com cal dolomítica), silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminatos e sulfoaluminatos de cálcio hidratados. Paralelamente observa-se que a caulinita e a gibbsita (quando presente), constituintes originais dos solos, foram afetadas pelos aditivos. O grau de desordem da caulinita parece aumentar com o teor de cálcio, enquanto que a gibbsita aparentemente desaparece. São indícios de reações "pozolânicas" estabelecidas entre o hidróxido de cálcio (oriundo da cal e do cimento) e esses constituintes;

- as neoformações minerais, transformações e reorganizações do material das misturas são mais evidentes naquelas em que foi empregada a cal cálcica do que naquelas com cal dolomítica (com ou sem cimento). Essas diferenças implicam em maior estabilidade das misturas tratadas com cal cálcica, como foi comprovado no teste de estabilidade dos agregados face à água e como comprovam também os dados de desempenho da pista (Capítulo III).

3. AS ORGANIZAÇÕES MICROESTRUTURAIS, TRANSFORMAÇÕES E NEO-SÍNTESES

As observações morfológicas, realizadas inicialmente a níveis macro e mesoscópico, foram detalhadas através da microscopia óptica sobre lâminas delgadas e microscopia eletrônica de varredura sobre fragmentos indeformados. Os materiais e organizações reconhecidos nesse nível (microscópico) foram analisados quimicamente em termos qualitativos, com a realização de imagens de raios X, e quantitativos, através de sondagens pontuais e, em alguns casos, ao longo de cortes transversais com o emprego da sonda eletrônica.

Os resultados obtidos com estas técnicas são apresentados a seguir, para cada segmento, iniciando-se com os segmentos com base solo-cal-cimento e, depois, aqueles com cascalho de basalto alterado.

3.1. Segmento SCC/LR 1

- Micromorfologia

Nas lâminas delgadas o material do topo da camada apresenta fissuras horizontais, paralelas, com intervalos de 2,5mm ou um pouco mais, conformes e de paredes rugosas, que cortam todo o material. Essas fissuras apresentam larguras variáveis, até 40 μ , e algumas provavelmente se formaram no momento da coleta da amostra. O restante da porosidade é constituído por cavidades, mais ou menos esféricas a elipsoidais de vários tamanhos, com até 140 μ de ϕ (a maioria apresenta 60 de ϕ ou inferior a este. As

cavidades aparecem mais concentradas em determinadas zonas da lâmina do que em outras, sempre associadas à presença de aditivos. Geralmente não são interconectadas, mas às vezes ocorre uma interconexão que dá origem a cavidades maiores e de formas mais complexas. Em certas zonas elas estão de tal forma justapostas que conferem ao material um aspecto "vesicular" (ou esponjoso). Nas zonas de plasma contínuo, sem indícios evidentes de aditivos, observam-se também algumas cavidades, em menor número e mais espaçadas, com formas irregulares e maiores (com até 400 μ no seu eixo maior).

No topo da camada a porosidade corresponde a aproximadamente 15% do fundo matricial, aumentando significativamente em profundidade. Na porção central ela passa a cerca de 30%, com predomínio de poros intergranulares, interconectados, macro, meso e microporos. As cavidades estão, neste nível, numericamente reduzidas. Fissuras finas, curvas, conformes, que cortam agregados maiores aparecem nas zonas de plasma mais contínuo. A maioria são fissuras intragregados e algumas transagregados. Aparecem também as fissuras planares (horizontais) mais largas, que cortam todo o material, como aquelas presentes no topo.

Na transição da base tratada para o subleito a porosidade é novamente alterada com o predomínio absoluto de fissuras tipo "*joint planes*". As maiores são paralelas e horizontais, padrão retangular (macroscópico), paredes conformes, com abertura aproximada de 60 μ . Em algumas zonas, contudo, aparecem cavidades que às vezes estão interconectadas. Nas poucas zonas onde se identifica a presença de aditivos ocorrem os poros de empilhamento ("*packing voids*").

O esqueleto nesse material representa menos de 5% (em geral aproximadamente 3%) do fundo matricial. É constituído, sobretudo, por grãos de quartzo pequenos (ϕ médio 80 μ), brancos, brilhantes, angulosos, de formas irregulares, e alguns minerais escuros, distribuídos aleatoriamente. Aparece, também, um pequeno número de grãos de carbonatos, alguns com tamanhos equivalentes aos grãos de quartzo. Os maiores apresentam formas grosseiramente ortorrômicas. Este número se reduz do topo para o contato com o subleito, onde são raros e menores.

O plasma é, em geral, vermelho-escuro vivo nas zonas mais densas e mais claro (até vermelho-amarelado) nas zonas mais porosas. Com aumento forte, percebe-se que o plasma vermelho-escuro apresenta uma baixa anisotropia, com apenas algumas manchas vermelhas (pequenas e esparsas) orientadas, estrutura argilassépica. Nas zonas mais porosas, o plasma é vermelho-amarelo (Luz Natural) e silassépico.

No topo da camada o material apresenta-se contínuo, com a ocorrência de pequenos volumes arredondados de plasma mais vermelho, embebidos no plasma mais amarelado (Foto 8, Prancha III), predominante. É no plasma mais amarelado que se percebe a extinção de pequenos grãos (silassépico). São zonas com evidentes sinais da presença de cal e cimento. Nas zonas mais contínuas o plasma torna-se vermelho-amarelado em direção às cavidades maiores (Foto 9, Prancha III). Presença de extinção em rosetas (vermelho-claro vivo) em alguns setores.

Na parte central da camada o material está microagregado (Foto 10, Prancha III). Estes microagregados são constituídos de plasma vermelho-escuro, argilassépico e em alguns casos isótico (micronódulo característico), orlados por plasma de cor mais clara, vermelho-amarelo, e que os soldam entre si. O plasma mais claro apresenta uma birrefringência maior, principalmente nas áreas onde se concentram pontos pequenos brilhantes, geralmente em torno de vazios (Foto 11, Prancha III). A estrutura plásmica é silassépica.

Na parte inferior, o material se organiza novamente de uma forma contínua (Foto 12, Prancha III), predominando o plasma vermelho-escuro, com anisotropia mais alta, apresentando orientações plásmicas estriadas que caracterizam a estrutura plásmica como massépica. O plasma é contínuo e homogêneo nas áreas onde não há indícios de aditivos. Entretanto, nas zonas atingidas pelos aditivos, o plasma aparece microagregado, tendo nas bordas os produtos resultantes das reações dos aditivos, que evidenciam os seus contornos (Foto 13, Prancha III). Aparentemente o plasma dos agregados parece não ter sido afetado, ocorrem apenas depósitos brancos ou vermelhos bem claro ao seu redor e nas paredes dos vazios (cavidades ou poros de empilhamento). A feição característica nesta lâmina é a oposição de áreas de plasma contínuo com áreas com

aspecto de mosaico (microagregados orlados pelos produtos de reação dos aditivos).

As imagens de raios X obtidas em dois dos três sítios apresentados aparecem na Prancha IV. A sequência de imagens para cada sítio é apresentada na vertical iniciando-se com a distribuição do cálcio, em seguida a do alumínio e por último a imagem de distribuição do ferro. As imagens do alumínio e do ferro evidenciam mais claramente (contraste), na maioria dos casos, as novas organizações e o efeito dos aditivos do que aquelas do silício.

A primeira sequência (14, 15 e 16) mostra as imagens obtidas para o sítio no topo da base, mostrado na Foto 9 (Prancha III). As imagens do cálcio (14) e do ferro (16) permitem reconhecer unidades morfológicas: destacam-se nas duas imagens um grande agregado ovalado e outros menores arredondados, onde o ferro está mais concentrado e o cálcio é raro. As zonas ricas em cálcio coincidem com aquelas pobres em ferro; pode-se dizer que uma imagem é o negativo da outra. O alumínio (15) e o silício, ao contrário, se distribuem por toda a área do sítio, independentemente da presença do cálcio. Apenas nos pontos de maior concentração deste elemento é que ocorre uma diminuição mais expressiva do alumínio e do silício. Os pontos de concentração do cálcio aparecem relacionados às cavidades vistas na Foto 9 (Prancha III) e às suas bordas. No interior das cavidades distinguem-se, em microscopia óptica, pontos brancos, que correspondem na imagem do cálcio aos pontos onde este elemento está mais concentrado. Essas imagens indicam que as cavidades não estão vazias, mas sim, em muitos casos, preenchidas por um material incolor que não é visível ao microscópio óptico. Esse material tem na sua composição cálcio e quantidades variáveis de alumínio e silício. Mostram ainda que há uma difusão do cálcio para o plasma em torno das cavidades e que a partir de determinadas quantidades de ferro, esta "difusão" cessa.

A segunda sequência de imagens de raios X da Prancha IV, foi realizada sobre o sítio reproduzido na Foto 13 (Prancha III), localizado na porção inferior da camada. Neste caso a imagem do alumínio (18) e do ferro (19) reproduzem as formas dos agregados observadas na Foto 13 (Prancha III). O alumínio, assim como o ferro, aparece um pouco mais concentrado no interior dos agregados maiores, enquanto que nos agregados

PRANCHA IV

SEGMENTO SCC/LR 1 - IMAGENS DE RAIOS X

Foto 14: Sítio 1, mostrado na Foto 9 (Prancha III). Imagem do cálcio. É possível distinguir o volume vermelho-escuro ovalado (PD). O cálcio se distribui no plasma vermelho mais claro, poroso. As cavidades, que na microscopia óptica parecem vazias, estão preenchidas por material rico em cálcio. Na imagem, o nº 1 assinala o local referente à cavidade (V) indicada na Foto 9. Comparando-se a Foto 9 com a imagem do Ca verifica-se que há uma difusão do cálcio no plasma das bordas dos agregados.

Foto 15: imagem da distribuição do alumínio, no mesmo sítio. Observa-se apenas uma concentração maior do alumínio no plasma de um volume arredondado na borda esquerda da imagem. O alumínio está presente também no interior das cavidades.

Foto 16: imagem da distribuição do ferro. Nesta imagem percebe-se que o plasma vermelho-escuro denso é mais rico em ferro do que o plasma vermelho mais claro poroso. Fica clara a incompatibilidade do ferro com o cálcio.

Foto 17: Sítio mostrado na Foto 13 (Prancha III). O cálcio se distribui ao longo de estreitas faixas (películas) e em pontos, praticamente sem difusão para o plasma adjacente - reações apenas nos contatos.

Foto 18: a imagem de distribuição do alumínio reproduz o contorno dos agregados, acompanhando grosso modo a distribuição do ferro - Foto 19.

Foto 19: imagem de distribuição do ferro. Esta imagem reproduz a forma dos agregados. Deve-se notar, entretanto, que as bordas estão empobrecidas neste elemento - os contornos estão recuados em relação àqueles da imagem do alumínio.

LEGENDA

CORES	TEORES (faixas - %)
rosa	0 - 14,28
branco	14,29 - 28,57
cinza claro	28,58 - 42,85
cinza escuro	42,86 - 57,14
preto	57,15 - 71,42
azul claro	71,43 - 85,71
azul escuro	85,72 - 100,00

menores parece haver uma ligeira diminuição dos teores em direção às bordas. A imagem do cálcio mostra que este elemento está concentrado junto às bordas dos agregados e no interior de fissuras que os delimitam. São áreas estreitas e pequenas que contornam os volumes de plasma dos agregados. Aparentemente não há indícios de difusão do cálcio para o plasma, e a reação com os seus constituintes, se presente, ocorre apenas nas zonas de contato (é pelicular). A comparação das Fotos 11 e 13 (Prancha III), que estão na mesma escala, evidenciam esse fato através da diferença na morfologia e na organização do plasma que é particular em cada sítio.

Os produtos de hidratação do cimento e de reação da cal com os constituintes do plasma estão em grande parte associados, como foi visto, às zonas de plasma mais poroso, principalmente junto às cavidades e poros de empilhamento. Destacam-se no plasma como pequenos pontos mais claros, brancos e amarelados (estrutura plásmica silassépica). Estão presentes também no interior de algumas fissuras. Assembléias cristalinas, na forma de cristalárias, ocorrem dentro de algumas cavidades.

Na Prancha V, observa-se uma série de fotos obtidas ao microscópio eletrônico de varredura sobre fragmentos indeformados, onde é possível verificar com mais detalhe as relações entre o plasma e os aditivos. Na Foto 20, observam-se os volumes de plasma vermelho-escuro, arredondados, característicos do topo da base. Verifica-se a existência de fissuras em torno desses volumes, individualizando-os dentro do plasma contínuo e com poros cavitários. Dentro das cavidades, vê-se, mesmo com pequenos aumentos (100X), a presença de produtos neoformados, que aparecem em detalhe na Foto 21. Destacam-se no interior do poro minerais mais longos, com formato de agulhas, que morfologicamente se assemelham aos sulfoaluminatos de cálcio (TERRIER, 1976), enquanto que junto às bordas aparecem outros menores e com formas menos definidas, como fibras emaranhadas, às vezes formando "agregados", como aquele no alto da Foto 21. O espectro de raios X realizado sobre as fibras indicou a presença predominante de cálcio acompanhado de alumínio e silício, o que leva a supor que se trata de aluminossilicatos de cálcio hidratados (CASH). CHOQUETTE et al. (1987) também identificaram como CASH produtos neoformados com morfologia semelhante a estes, em misturas de argilas com cal. Os "agregados" são mais ricos em silício e a presença do

PRANCHA V

SEGMENTO SCC/LR 1 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Foto 20: aspecto geral da organização da mistura solo-cal-cimento. Identifica-se ao centro da foto um volume arredondado de plasma denso (PD) e cavidades preenchidas por material cristalizado em forma de agulhas.

Foto 21: detalhe dos produtos neoformados preenchendo a cavidade. Espectro qualitativos indicam que os cristais no centro do vazio, mais longos, são sulfoaluminatos de cálcio hidratados. Os mais curtos, emranhados, junto às bordas são provavelmente CASH. Os agregados (A), como aquele visto no alto da foto, são mais ricos em sílica e podem corresponder a fases CSH.

Foto 22: aspecto do plasma poroso (PP) entre volumes de plasma denso (PD). O plasma denso aparece fissurado (no alto da foto) enquanto que no plasma poroso aparecem cavidades e poros de empilhamento composto. O plasma poroso aparece microagregado e na superfície dos microagregados observam-se cristalizações - em detalhe na foto 23.

Foto 23: detalhe da superfície dos microagregados no plasma poroso. Presença de produtos neoformados com formas de "folhas" (detalhe na foto 24) e produtos de aspecto "amorfo" (detalhe na foto 25).

Foto 24: detalhe dos produtos formados na superfície dos microagregados - aspecto de folhas - provavelmente aluminossilicatos de cálcio hidratados.

Foto 25: detalhe dos produtos de aspecto "amorfo". Com aumentos maiores o material aparece parcialmente reticulado transformando-se gradualmente em um material de aspecto mais maciço. São fases ricas em sílica, podendo corresponder, a fase reticulada, ao C-S-H.

alumínio é bem reduzida, podendo tratar-se, neste caso, de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Parece existir uma descontinuidade física (fissura) entre os produtos neoformados e o plasma.

Em outro ponto de observação, correspondendo a porção central da camada, onde a porosidade é maior, verifica-se uma distinção mais acentuada entre os dois tipos de plasma. O plasma mais denso aparece orientado e fissurado internamente, enquanto que o outro se divide em pequenos microagregados (Foto 22), cuja superfície aparece recoberta por produtos neoformados (Foto 23). Estes produtos têm um aspecto diferente dos anteriores, e só são visíveis com aumentos superiores. Aparecem como pequenas folhas, com distribuição desordenada (Foto 24), ou como uma rede reticular que passa gradualmente para um material mais maciço, sem forma específica (Foto 25). Os espectros de raios X mostram que os minerais planares são constituídos por cálcio e proporções menores de alumínio e silício, podendo corresponder a outras formas de aluminossilicatos de cálcio hidratados. As formas reticulares podem estar associadas a silicatos de cálcio hidratados.

Em cavidades isoladas foram observados cristais com forma de placas hexagonais, empilhadas (acordeon), revestindo as paredes. Em fissuras foram identificados materiais com aspecto mais homogêneo e compacto que aquele do solo, que se transforma nas bordas, em direção ao vazio, em cristais hexagonais espessos. O espectro de raios X indica que se trata de uma fase formada exclusivamente por cálcio, provavelmente a portlandita.

Ao microscópio eletrônico de varredura, apesar de não chamar a atenção como os produtos neoformados, é preciso ressaltar o aspecto da superfície dos agregados que tem, nas áreas afetadas pelos aditivos, um caráter particular: às vezes parece apresentar um recobrimento por uma substância "amorfa", possivelmente semelhante àquela observada na Foto 25; outras, os constituintes do plasma aparecem como que "erizados", dando um aspecto mais rugoso à superfície. Espectros realizados nesses campos indicaram a presença importante do cálcio ao lado do silício, alumínio e proporções menores de ferro.

Como foi visto no Capítulo II, os produtos de hidratação do cimento e aqueles gerados pela reação da cal com os constituintes do plasma dos solos (reação pozolânica) são semelhantes, têm a mesma natureza química e mineralógica. Nas misturas solo-cal-cimento, como esta analisada, é difícil distinguir, dentre os produtos neoformados, quais são originados pela hidratação do cimento e quais os resultantes da reação pozolânica da cal. Na hidratação do cimento são gerados principalmente os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e secundariamente os aluminatos de cálcio hidratados (C_3AH_6 e C_4AH_{13}) que, em princípio, devem ocupar os poros cavitários e os de empilhamento. Para gerar os produtos a cal precisa estabelecer reações com os constituintes do plasma; é deles que ela retira o alumínio e o silício para formar novos compostos. É possível supor, portanto, que os produtos de reação "pozolânica" sejam, em parte, aqueles na superfície dos agregados que podem não chegar a desenvolver cristais, mas sim, substâncias mal cristalizadas ou mesmo amorfas.

- Transformações e neo-sínteses

DRON (1978), no seu trabalho sobre a atividade pozolânica, apresenta dois diagramas de hidratação do sistema $CaO - SiO_2 - Al_2O_3$, um em presença de gipso e outro na ausência do gipso (Fig. 42). Este autor assume que para um determinado material, cuja composição química está plotada no diagrama como ponto Z, misturado com cal, que corresponde quimicamente ao ponto no vértice C, os produtos originados pela reação pozolânica terão composições químicas que variaram ao longo da reta Z-C. As fases minerais presentes são aquelas que correspondem aos vértices do domínio triangular onde se localiza o ponto representativo da sua composição. O autor identifica dois domínios principais: o I com teores mais baixos de cálcio que, quando atinge o equilíbrio, apresenta três fases neoformadas - o silicato de cálcio hidratado, o aluminato tetracálcico hidratado e a gehlenita hidratada (C_2ASH_8); o II, mais rico em cálcio, que apresenta como fases a própria cal (cálcio em excesso), o silicato de cálcio hidratado e o aluminato tetracálcico hidratado. Quando as reações acontecem em presença de sulfato de cálcio

Fig. 42: Diagrama de hidratação do sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (DROM, 1978)

- a) em ausência de gipso
- b) em presença de gipso

Z - composição química do material original - Reta Z - C = possibilidade de reações pozolânicas

- I - domínio de reação pozolânica com teores mais baixos de cálcio. Apresenta três fases neoformadas: o silicato de cálcio hidratado, o aluminato tetracálcico hidratado e a gehlenita hidratada (C_2ASH_8);
- II - domínio mais rico em cálcio. Apresenta como fases a própria cal (cálcio em excesso), o silicato de cálcio hidratado e o aluminato tetracálcico hidratado.

Quando as reações acontecem em presença de sulfato de cálcio podem aparecer os sulfoaluminatos e o diagrama de fases é modificado (b)

podem aparecer os sulfoaluminatos e o diagrama de fases é modificado.

Os resultados das análises pontuais (Tabela 24) realizadas sobre o sítio 1 (SCC/LR 1 - S1) mostrado na Foto 9 (Prancha III), e na seqüência de imagens de raios X da Prancha IV, estão plotados no diagrama triangular do sistema $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ da Fig. 43, juntamente com dados obtidos em outro sítio semelhante (S2). Nestes casos observa-se que a composição química da mistura se desloca da zona de ocorrência do plasma original, apresentando vários pontos mais enriquecidos em sílica, ligeiramente empobrecidos em alumina, e com presença de cálcio (o mínimo em torno de 3% ou um pouco menos, até cerca de 10%). Este conjunto de pontos caracteriza a zona de plasma transformado. Dois pontos estão situados dentro do domínio II, rico em cálcio, próximo da zona de composição do cimento portland, indicando a presença de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Um outro ponto, situado no domínio I, indica a presença de uma fase neoformada menos rica em cálcio que a anterior, podendo ainda ser C-S-H ou um aluminossilicato de cálcio hidratado.

Dados químicos obtidos em duas cristalárias (Tabela 25 e Fig. 44) mostram uma "seqüência" de variação de composição química das fases presentes, que se situam ao longo de uma linha que parte da zona de composição do plasma original em direção à zona de composição da cal cálcica. Estes dados mostram que houve uma reação do plasma com o aditivo cal, como propõe DRON (1978), fazendo surgir uma gama de produtos cada vez mais enriquecidos em cálcio, numa seqüência de transformações e neo-sínteses que interligam os dois extremos: plasma e cal. Convém ressaltar que estas sondagens foram aleatórias dentro das cristalárias e que são pontos analisados em duas diferentes áreas da lâmina delgada. Nesta situação estão presentes fases silicáticas mais ricas e mais pobres em cálcio e fases aluminossilicáticas de cálcio hidratadas, bem como carbonatos, resultantes do excesso de cal nesta zona. ROSSI et al. (1983, 1992) detectou uma variedade de fases minerais neoformadas (aluminatos, aluminossilicatos, silicatos de cálcio hidratados e carbonatos), presentes em cristalárias, em mistura de Latossolo Roxo com 5% de cal cálcica.

Para melhor esclarecer essas relações plasma/produtos neoformados foram

Tabela 24: Análises químicas pontuais (microsondagens) - SCC/LR 1, sítios 1 e 2
Resultados normalizados a 100%

SÍTIO	PONTO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O
Sítio 1	01	30,57	24,38	19,46	3,81	0,45	21,02	0,23	0,07
	02	59,21	10,99	16,03	7,33	0,26	5,11	0,82	0,25
	03	44,35	13,69	29,27	5,15	0,26	5,81	1,09	0,37
	04	29,86	21,95	35,91	3,97	0,15	7,94	0,00	0,22
	05	37,25	24,55	29,25	3,22	0,14	5,46	0,00	0,13
	06	58,68	16,58	17,67	2,63	0,19	3,64	0,56	0,05
	07	37,14	18,39	27,55	8,12	0,16	7,79	0,63	0,23
	08	57,14	15,91	14,77	2,41	0,18	7,73	1,51	0,35
	09	39,33	21,66	22,08	4,18	0,50	11,03	1,08	0,14
	10	43,79	17,99	26,60	5,52	0,30	5,26	0,27	0,26
	11	38,98	26,12	26,35	3,31	0,42	4,06	0,59	0,17
	12	48,87	18,73	16,09	2,89	0,16	11,79	1,25	0,22
	13	35,53	21,58	33,94	4,28	0,02	4,44	0,00	0,21
	14	24,17	11,47	42,60	18,11	0,18	2,39	0,97	0,14
Sítio 2	01	58,56	14,91	16,35	2,64	0,29	5,73	1,33	0,19
	02	32,90	19,89	3,46	0,55	3,60	36,44	3,16	0,00
	03	50,89	15,78	11,64	1,97	0,51	17,84	1,04	0,33
	04	33,47	4,70	3,11	0,57	0,45	56,46	0,90	0,34
	05	64,21	13,17	14,27	2,76	0,05	4,56	0,72	0,26
	06	76,57	8,28	9,68	1,95	0,13	3,09	0,09	0,21
	07	35,21	22,84	29,31	7,31	0,08	4,52	0,47	0,26
	08	34,99	20,25	26,26	7,10	0,28	10,63	0,34	0,16
	09	66,17	13,78	10,46	2,03	0,21	6,73	0,46	0,17
	10	31,29	3,30	1,62	0,18	1,06	61,94	0,46	0,14

Fig. 43: Diagrama triangular CaO-SiO₂-Al₂O₃ - Segmento SCC/LR 1, sítios 1 e 2.

Fig. 44: Diagrama triangular CaO-SiO₂-Al₂O₃ - Segmento SCC/LR 1, cristalárias

Tabela 25: Análises químicas pontuais - SCC/LR 1, cristalárias 1 e 2

SÍTIO	PONTO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O
Cristalária 1	01	52,07	22,73	19,68	3,00	0,60	1,02	0,74	0,17
	02	48,50	33,20	4,52	0,28	0,39	12,38	0,43	0,30
	03	10,67	7,19	0,82	0,00	0,62	80,70	0,00	0,00
	04	35,86	24,32	3,51	0,00	0,51	35,13	0,53	0,14
	05	39,68	28,72	4,66	0,15	0,41	25,60	0,56	0,23
	06	41,94	30,73	4,19	0,38	0,41	21,45	0,62	0,28
	07	27,60	22,09	2,89	0,19	0,39	46,63	0,22	0,00
	08	9,92	6,35	1,66	0,02	1,13	80,47	0,31	0,14
	09	19,52	7,66	2,68	0,56	0,63	68,73	0,16	0,07
	10	20,20	12,30	25,62	3,33	0,87	37,07	0,52	0,10
	11	38,04	21,75	34,18	3,36	0,18	1,39	,88	0,22
	12	47,55	33,24	15,30	1,25	0,34	1,28	0,80	0,24
	13	50,50	36,44	7,71	2,69	0,19	1,18	0,89	0,39
	14	35,58	25,17	32,77	3,05	0,65	1,83	0,68	0,27
	15	38,13	30,15	26,01	4,25	0,28	0,85	0,25	0,07
Cristalária 2	01	21,40	10,57	7,60	2,03	0,44	57,51	0,44	0,00
	02	62,80	11,05	9,03	1,48	0,51	12,43	2,10	0,61
	03	8,52	4,96	2,74	0,58	0,76	82,44	0,00	0,00
	04	32,52	11,66	15,70	2,30	0,91	35,99	0,78	0,15
	05	43,66	27,14	23,12	3,20	0,38	1,45	0,90	0,15
	06	20,67	6,28	4,03	0,44	1,05	66,62	0,83	0,07
	07	13,58	4,77	3,07	0,49	0,47	77,37	0,11	0,15
	08	16,94	6,93	6,48	1,15	0,52	67,53	0,44	0,00
	09	48,14	22,54	23,75	2,93	0,63	1,18	0,69	0,14
	10	45,26	18,24	18,57	5,96	0,51	8,88	1,89	0,69
	11	25,81	9,65	6,40	1,58	0,73	55,51	0,18	0,13
	12	28,04	16,61	23,40	8,66	0,45	20,87	1,86	0,11
	13	33,37	20,74	24,33	8,00	0,68	11,43	1,38	0,09
	17	63,28	15,11	12,87	2,70	0,48	3,34	1,61	0,61
	18	15,28	6,10	4,29	0,80	0,86	72,00	0,51	0,17

realizados dois cortes transversais, procurando-se localizá-los sobre zonas características. Assim, o corte 1 foi realizado sobre uma área de contato entre o plasma vermelho, denso, e o plasma mais claro, poroso; o corte 2, sobre uma zona de cristalária em contato com plasma denso, numa situação semelhante àquela mostrada pela Foto 11 (Prancha III).

Na Fig. 45a é apresentado o diagrama triangular do sistema $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$, contendo os dados obtidos através de microsondagens ao longo do corte transversal 1 sobre a lâmina delgada, sítio 1. Cem pontos, um a cada 1μ , foram analisados ao longo do corte. Os pontos definem 4 domínios químicos distintos: o primeiro referente a uma composição próxima do plasma original do solo; o segundo com teores de Al_2O_3 próximos ao do plasma, com redução gradual de SiO_2 e enriquecimento de CaO ; o terceiro, pobre em alumínio e mais rico em sílica e cálcio do que o primeiro; e um outro domínio que engloba os produtos de hidratação e de reação pozolânica, constituídos principalmente por fases de C-S-H. A partir do campo característico do plasma aparece uma série de pontos alinhados em direção ao domínio dos produtos neoformados indicando que há a transformação gradual do plasma (domínio 2), com a presença de fases intermediárias, até o produto de neo-síntese (aluminossilicato de cálcio hidratado); o mesmo acontece a partir do campo originalmente mais rico em sílica e cálcio. Esse corte transversal não apresenta pontos na região mais rica em cálcio, o que indica que atravessa efetivamente uma zona onde o plasma e os aditivos estão intimamente associados.

Os gráficos que exibem as relações entre o CaO e o SiO_2 (Fig. 45b) e entre o CaO e o Al_2O_3 (Fig. 45c) mostram que as transformações a partir do plasma ocorrem com a manutenção relativamente constante dos teores de alumina e sílica, até um determinado ponto, enquanto ocorre um enriquecimento gradual em cálcio e, ao que tudo indica, às expensas do ferro. A partir do ponto limite (quando o teor de cálcio ultrapassa o teor de alumínio, as reações envolvem fases cada vez mais empobrecidas em alumínio e ferro, enquanto que a sílica se mantém em níveis mais elevados.

Na Fig. 46, os pontos estão plotados ao longo do corte e é possível visualizar como ocorrem as variações dos principais elementos. Ficam evidentes quimicamente as zonas

Fig. 46: Composição química do plasma denso, do plasma poroso e da zona de transição ao longo do corte transversal 1, SCC/LR 1(sítio 1).

Fig. 47: Distribuição do CaO e MgO ao longo do corte transversal 1 - SCC/LR 1

de plasma denso e a zona de plasma poroso onde aparecem as neo-sínteses, interligadas por uma zona de transição com transformações graduais. Na Fig. 47, aparece apenas a distribuição linear do cálcio e do magnésio e nota-se que quando o magnésio ocorre de forma mais concentrada há uma redução importante do cálcio.

O corte transversal 2 (Fig. 48) mostra um outro tipo de relação entre as organizações: o plasma denso (vermelho-escuro) está em contato com uma zona rica em cálcio (cristalária), sem a existência da faixa de transformação gradual e do plasma poroso. Neste corte, o magnésio se apresenta duas zonas de concentração dentro da cristalária que correspondem, também, a pontos com redução do teor de cálcio (Fig. 49).

No diagrama triangular (Fig. 50a), observa-se a existência de apenas dois domínios, um referente ao plasma denso e outro localizado na zona rica em cálcio (cristalária), e com poucos pontos em posições intermediárias. Aqui, verifica-se que houve excesso de Ca(OH)_2 (oriundo da cal ou do cimento), o que resultou em formação de carbonatos ao lado de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Nos gráficos que mostram a relação entre o CaO e o SiO_2 (Fig. 50b) e o CaO e o Al_2O_3 (Fig. 50c), nota-se um comportamento diferente em comparação com o caso anterior. Aqui as reações se processam com enriquecimento de cálcio, em geral acompanhado pelo empobrecimento de sílica e de alumina. Os pontos que fogem a esta tendência são aqueles enriquecidos em magnésio. Estes produtos apresentam duas composições particulares: uma fase onde os teores de MgO estão compreendidos entre 10% e 30% (teores normalizados), ainda rica em alumina e sílica e com presença importante de FeO ; outra com teores de MgO superiores a 30%, pobre em alumina ($< 7\%$) e com teores de sílica entre 10% e 15%.

A diferenciação do plasma original do solo em um outro tipo, quimicamente mais rico em cálcio, com sílica e alumina em proporções variáveis e pobre em ferro, é resultante da ação direta dos aditivos e pode-se considerá-lo como plasma transformado. O plasma vermelho-escuro, denso, foi, ao que tudo indica, preservado do ataque dos aditivos, e mantém a sua composição química original ou muito próxima da original. Nas cristalárias observa-se uma variedade de fases, marcadas pelo enriquecimento gradual de cálcio até a formação de carbonatos, como uma solução sólida.

Fig. 48: Composição química do plasma denso e de cristalária (da zona de transição estreita) ao longo do corte transversal 2, SCC/LR 1(sítio 2).

Fig. 49: Distribuição do CaO e MgO ao longo do corte transversal 2 - SCC/LR 1

3.2. Segmento SCC/LR 2

No topo da camada, a porosidade corresponde a aproximadamente 10% do fundo matricial e é constituída principalmente por fissuras finas, em geral paralelas (às vezes descontínuas) entre si e horizontais. Ocorrem também fissuras verticais, oblíquas (mais finas) e curvas, em torno de volumes arredondados, que se interconectam formando uma rede grosseiramente retangular. Verifica-se, ainda, a presença de algumas cavidades pequenas ($+ 60\mu$ no eixo maior) e arredondadas (Foto 26, Prancha VI).

Na parte central e inferior da camada (Foto 27, Prancha VI), a porosidade passa a corresponder a cerca de 30% do fundo matricial e é composta predominantemente por cavidades interconectadas e por vazios de empilhamento (*packing voids*) e secundariamente por fissuras. O padrão de distribuição das fissuras é irregular e menos denso que na porção superior. Aqui, elas delimitam, em geral, volumes de plasma mais denso e de formas mais arredondadas. Na maior parte dos casos são conformes e não apresentam produtos de hidratação ou de neoformação diretamente associados. Ao nível da lâmina, não estão interconectadas, como no caso anterior. As cavidades, por sua vez, apresentam formas e tamanhos irregulares, às vezes interconectadas por fissuras e entre si. Os vazios de empilhamento, não são tão característicos, parecem mais como uma coalescência de cavidades e ocorrem em alguns locais onde o plasma ainda se apresenta microagregado.

O esqueleto do material da base, neste segmento, é composto pelos grãos de quartzo e de minerais escuros, originais do LR, e por grãos de carbonatos. Os grãos de carbonatos são mais numerosos, correspondem a cerca de 65% a 70% do esqueleto no topo da camada, diminuindo ligeiramente nas porções central e inferior. Observa-se, também, uma variação quanto à distribuição ao longo da espessura da camada: no topo, os grãos do esqueleto, estão englobados no plasma e alinhados segundo um padrão de distribuição aproximadamente retangular; em direção à parte inferior, os grãos de carbonatos tanto estão englobados no plasma como dentro de vazios, e a distribuição dos grãos em geral é aleatória.

As formas exibidas pelos grãos de carbonatos (ortorrômicas), assim como a sua inclusão no padrão de distribuição do esqueleto no material, denunciam a sua cristalização prévia, anterior à mistura, ou seja, a carbonatação da cal.

O plasma vermelho-escuro, vivo, contínuo, de anisotropia fraca, argilassépico, com alguns pontos (poucos) com extinção em "rosetas", predomina neste material e aparece no topo da camada como volumes arredondados que se destacam num plasma contínuo mais claro e menos abundante. Estreitas faixas de plasma vermelho mais claro aparecem junto a algumas fissuras, bordas de cavidades e em torno de agregados, principalmente a partir do centro da camada onde são mais numerosos. Este plasma apresenta pequenos pontos (dimensão do silte) mais claros, branco-amarelados, que se concentram em determinadas zonas, geralmente mais associados às zonas de ocorrência de cavidades (Foto 27, Prancha VI). Este aspecto confere ao plasma um caráter silassépico, ou mais precisamente poro-silassépico.

Os produtos de hidratação e de neoformação são, neste nível de observação, menos numerosos que no caso anterior (SCC/LR 1). Foram observadas algumas cristalárias, em geral com minerais junto às paredes e o centro vazio.

A microscopia eletrônica de varredura (Foto 28, Prancha VI), mostra em detalhe o aspecto das bordas dos volumes arredondados, individualizados na lâmina delgada apenas pela variação de cor e anisotropia (Foto 26, Prancha VI). Observa-se que os contornos dos volumes são marcados por uma organização particular do plasma, caracterizada por uma microporosidade importante aliada a uma microgranulação do material. Este fenômeno ocorre em faixas estreitas contornando os volumes. Neste material a feição característica do plasma "transformado" é a microgranulação. Não foram observados outros produtos neoformados.

As imagens de raios X (Prancha VI) realizadas sobre o sítio da Foto 26, que mostram a distribuição do cálcio (29) e do magnésio (30), indicam que os minerais que compõem a assembléia cristalina, em destaque na Foto 28 (Prancha VI), são constituídos principalmente por esses elementos. O magnésio ocupa zonas bem definidas, não se disseminando pelo plasma. O cálcio, ao contrário, apresenta-se mais distribuído, em

PRANCHA VI
SEGMENTO SCC/LR 2

Foto 26: aspecto geral da mistura solo-cal-cimento (cal dolomítica) no topo da camada. O material apresenta-se contínuo, predominando o plasma vermelho-escuro (denso). Identificam-se volumes arredondados de plasma mais escuro englobados em um plasma vermelho um pouco mais claro. Este plasma não se apresenta poroso, como no SCC/LR 1. Presença de fissuras horizontais. Ocorrem algumas zonas onde aparecem concentrações de aditivos e carbonatos (CA) - MO.

Foto 27: aspecto geral da mistura na parte central da camada. Neste nível o material se apresenta organizado em agregados (plasma denso - PD) e a porosidade (cavitária) aumenta. Na foto pode-se observar que as bordas dos agregados concentram mais pontos brancos e o plasma aparece mais claro - MO.

Foto 28: aspecto da organização do plasma (como aquele visto na foto 27) ao MEV. Os agregados justapostos apresentam uma borda de reação (BR). Nesta borda aparecem microgranulações - o limite do agregado aparece como uma "franja".

Foto 29: imagem de raios X do cálcio na zona apresentada na foto 26. O cálcio aparece concentrado formando os grãos de carbonatos. Não há difusão importante para o plasma.

Foto 30: imagem de raios X do magnésio. O magnésio acompanha a distribuição do cálcio. Como nesta mistura foi utilizada cal dolomítica pode-se afirmar que esta é uma zona de concentração de cal.

Foto 31: imagem de raios X do alumínio. Pela imagem do alumínio percebe-se que houve uma reação ao nível das bordas do plasma com a cal. O alumínio está presente dentro da cavidade.

LEGENDA

CORES	TEORES (faixas - %)
rosa	0 - 14,28
branco	14,29 - 28,57
cinza claro	28,58 - 42,85
cinza escuro	42,86 - 57,14
preto	57,15 - 71,42
azul claro	71,43 - 85,71
azul escuro	85,72 - 100,00

forma de pequenos pontos, sem auréolas importantes de difusão. Junto à área de concentração do cálcio e do magnésio, uma estreita faixa de plasma está afetado, aparece ligeiramente menos enriquecida em alumínio e ferro. Na imagem de distribuição do silício não aparecem diferenças significativas relacionadas à presença do cálcio ou do magnésio.

As microsondagens químicas efetuadas nesse sítio (Tabela 26, Fig. 51a) confirmam as transformações no plasma e a presença de alguns pontos situados no domínio rico em cálcio. Os dados foram também plotados em um diagrama do sistema $\text{CaO}+\text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (Fig. 51b), e aqui os pontos se alinham a partir da zona de ocorrência do plasma original em direção ao pólo $\text{CaO}+\text{MgO}$. Isto significa que existem fases minerais de transformação que se enriquecem gradualmente em cálcio e magnésio, à medida que perdem alumínio e silício.

3.3. Segmento SCC/LE

Ao nível da lâmina delgada (Foto 32, Prancha VII), a porosidade corresponde a aproximadamente 10% do fundo matricial e é formada basicamente por fissuras e poros cavitários. As fissuras são, em geral, paralelas; as maiores e mais largas cortam todo o material. Fissuras finas aparecem entre estas, são mais curtas e parcialmente interconectadas; algumas são retas (as mais finas), outras curvas. É comum ocorrerem no contato com os grãos do esqueleto.

O esqueleto, que já é abundante no solo original ((LE), aqui está mais concentrado, correspondendo entre 20% e 30% do fundo matricial. Aos grãos de quartzo, predominantes, e aos minerais escuros que constituem o esqueleto do LE, somam-se grãos de carbonatos (com as mesmas dimensões dos grãos de quartzo). Os grãos estão, grosso modo, alinhados segundo duas direções: linhas horizontais e paralelas entre si e

Tabela 26: Análises químicas pontuais (microsondagens) - Segmento SCC/LR 2, sítios 1 e 2 - resultados normalizados a 100%.

SÍTIO	PONTO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O
Sítio 1	01	41,42	24,93	22,03	3,71	0,47	3,74	3,54	0,15
	02	42,82	27,35	23,09	3,17	0,23	1,53	1,71	0,12
	03	39,76	23,42	16,87	3,32	0,30	13,20	2,94	0,19
	04	19,01	8,98	8,35	1,46	0,92	58,29	2,93	0,07
	05	29,19	24,62	14,21	2,00	0,64	6,34	23,00	0,00
	06	44,67	15,37	30,19	5,56	0,09	2,83	1,00	0,28
	07	37,16	27,42	25,55	6,06	0,19	1,65	1,73	0,24
	08	37,52	30,75	25,76	3,52	0,05	1,31	1,02	0,08
	09	42,60	16,80	28,04	7,71	0,32	3,36	0,96	0,21
	10	40,64	30,44	22,81	3,66	0,33	1,27	0,60	0,26
	11	52,45	14,36	10,82	1,84	0,52	12,18	7,63	0,19
	12	35,09	25,30	15,92	2,38	0,34	6,33	14,24	0,11
	13	14,95	13,37	5,50	0,52	1,01	44,11	20,54	0,00
	14	15,18	1,15	1,38	0,00	0,51	51,18	30,58	0,02
	15	10,57	4,11	0,90	0,08	1,08	47,06	36,20	0,02
	16	24,13	19,79	6,59	1,42	1,02	8,55	38,49	0,00
	17	39,67	30,03	22,48	3,74	0,27	1,97	1,76	0,08
	18	44,88	28,38	16,73	2,14	0,25	4,32	3,05	0,24
Sítio 2	01	33,13	26,78	25,84	11,77	0,15	1,45	0,74	0,15
	02	38,29	30,57	24,87	3,42	0,28	1,29	1,13	0,14
	03	45,70	26,96	21,58	3,04	0,26	1,59	0,80	0,07
	04	42,02	29,08	22,95	3,03	0,28	1,44	0,99	0,22
	05	66,16	6,29	0,96	0,15	0,62	9,10	16,61	0,11
	06	38,19	18,53	16,31	1,31	0,97	21,34	1,87	1,49
	07	46,74	12,94	6,83	0,86	2,79	25,63	4,17	0,04
	08	49,84	28,33	16,77	2,25	0,17	1,64	0,91	0,09
	09	46,96	25,31	15,92	3,65	0,32	4,82	2,76	0,27
	10	39,74	27,08	19,90	4,66	0,86	5,42	2,22	0,13

Fig. 51: Análises químicas pontuais do segmento SCC/LR 2, sítio 1.

- a) Diagrama triangular do sistema $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$
- b) Diagrama triangular do sistema $\text{CaO} + \text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$

outras menores, perpendiculares a ligeiramente oblíquas a estas, como mostra a Foto 32.

O plasma no material da base perde a sua organização em microagregados, característica dos Latossolos, e se apresenta de forma contínua. Distingue-se um plasma vermelho-escuro, argilassépico (Foto 33, Prancha VII), com extinção em "rosetas" (dispersas), que aparece entremeado com um outro plasma de coloração mais clara, silassépico, pontuado de grãos (dimensão do silte $< 20\mu$) branco-amarelados e brilhantes. Os pontos claros, brilhantes, estão mais concentrados em torno dos vazios e de alguns grãos do esqueleto.

A distribuição dos dois tipos de plasma pode variar: em determinadas zonas o plasma vermelho-escuro com "rosetas" domina sobre o plasma mais claro silassépico; em outras, o plasma vermelho aparece como ilhas dentro do plasma mais claro. No contexto da lâmina o plasma vermelho-escuro é dominante.

A diferenciação do plasma original nesses dois novos tipos está relacionada à sua reação com a cal e o cimento adicionados. O caráter silassépico, que só aparece na mistura, é produzido pelos produtos de hidratação do cimento e de reação com os constituintes do plasma (Foto 34, Prancha VII). As "rosetas", aparecem como manchas vermelhas vivas, arredondadas, com extinção característica reta - 90° .

Nos vazios, dentro do plasma silassépico, ocorrem assembléias cristalinas: as cristalárias (Foto 34). Apesar da dificuldade de se distinguirem formas e tamanhos nos elementos que compõem essas assembléias, é possível observar, naquelas que ocupam cavidades maiores, um padrão diferenciado de distribuição dos elementos a partir das bordas em direção ao centro do vazio. Em muitos casos ocorre também uma variação na coloração dos elementos: mais amarelados nas bordas (contato com o plasma) e mais brancos à medida que se afastam delas. Em algumas cristalárias observa-se a presença de pequenos grãos (compactos) de carbonatos, geralmente ocupando as porções centrais dos vazios. Estas assembléias se formam nas zonas de concentração dos aditivos, que macroscopicamente aparecem como pontos brancos.

Ao microscópio eletrônico de varredura a organização destes plasmas aparece

PRANCHA VII

SEGMENTO SCC/LE

Foto 32: aspecto da organização da mistura solo-cal-cimento em uma zona de plasma vermelho-escuro contínuo. Na foto observam-se as separações plásmicas (SP) estriadas em zonas subparalelas - estrutura plásmica massépica - e pontos com extinção característica (rosetas - R) Observa-se também o alinhamento dos grãos do esqueleto (EO) segundo um padrão aproximadamente retangular - MO.

Foto 33: aspecto da organização da mistura solo-cal-cimento em uma zona com aditivos. Observam-se volumes de plasma vermelho-escuro denso (PD), pontuado de rosetas (R) em contato com o plasma vermelho mais claro e poroso (PP) pontuado de grãos pequenos brancos e branco-amarelados (plasma silassépico) - MO.

Foto 34: detalhe do plasma vermelho mais claro e poroso em contato com uma cristalária. Nesta foto observa-se que o plasma nas bordas dos agregados foi transformado (PT) pelos aditivos. Ele fica bem mais amarelo e com os limites difusos. Na cristalária (C) observam-se zonas onde os produtos estão mais aglomerados e compactos - MO.

Foto 35: aspecto da organização do plasma vermelho-escuro contínuo (como aquele mostrado na foto 32) visto em MEV. O plasma aparece orientado (PO) englobando grãos do esqueleto (E). No contato plasma/grão ocorrem fissuras.

Foto 36: aspecto da organização do plasma vermelho mais claro e poroso (PP) ao lado de um volume de plasma denso (PD). Este arranjo corresponde a uma situação semelhante àquela observada na foto 34, onde aparece o plasma transformado nas bordas dos agregados. - MEV.

Foto 37: observa-se em detalhe o plasma transformado (PT) nas bordas dos agregados e os produtos neoformados (em forma de fibras - PN) dentro dos pequenos vazios. Notar a textura "pilosa" ou "aveludada" da superfície dos agregados.

bem distinta. Na Foto 35 (Prancha VII) observa-se o aspecto do plasma vermelho-escuro, denso e orientado, envolvendo grãos do esqueleto. O plasma mais claro aparece, como pode ser verificado na Foto 36, microagregado e com uma porosidade importante. A superfície dos microagregados e paredes de poros exibem, a grandes aumentos, um aspecto "piloso", devido em parte à presença de produtos neoformados com formas de fibras (Foto 37) e em parte à não orientação das partículas argilosas que compõem o plasma. Na Foto 34, obtida ao microscópio óptico, a superfície dos agregados apresenta limites difusos, onde o plasma parece ir perdendo, aparentemente, cor e matéria.

Do ponto de vista químico constata-se, através das imagens de raios X (Prancha VIII) realizadas sobre os sítios apresentados nas Fotos 34 e 32 (Prancha VII), uma composição química particular para cada uma das organizações. O plasma vermelho-escuro, denso, é quimicamente homogêneo; as rosetas correspondem a pequenas zonas, arredondadas, de concentração de cálcio, com pequena "auréola" de difusão deste elemento (38, Prancha VIII). Parece não haver alteração do plasma, como mostram as imagens de distribuição do alumínio (39) e do ferro (40).

O plasma mais claro, poroso, ao contrário, apresenta uma variação química importante: as bordas dos agregados são, como mostram as imagens de distribuição do alumínio (42) e do ferro (43), empobrecidas nestes elementos e enriquecidas em cálcio (41). O ferro é aparentemente incompatível com a presença do cálcio. O cálcio concentrado nas cristalárias, no interior dos poros, se difunde para o plasma dos agregados afetando, assim, as suas bordas, enquanto que o interior fica mais preservado.

A imagem de distribuição do cálcio (41) mostra, por sua vez, que este elemento se concentra em determinadas áreas, dentro dos poros, tendo em torno uma auréola de "difusão", de forma irregular (em geral a forma do vazio), com teores decrescentes em direção às bordas dos agregados.

Microsondagens químicas realizadas em alguns pontos desses dois sítios, cujos dados, apresentados na Tabela 27, estão plotados nos diagramas triangulares dos sistemas $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (Fig. 52) confirmam estas observações. O plasma original sofre transformações químicas, deslocando a sua posição

PRANCHA VIII
SEGMENTO SCC/LE - IMAGENS DE RAIOS X

Foto 38: imagem da distribuição do cálcio em zona de plasma contínuo vermelho-escuro (semelhante ao da Foto 32). As feições que aparecem como rosetas (R) em MO correspondem a pontos de concentração de cálcio no interior deste plasma.

Foto 41: imagem da distribuição do cálcio no plasma vermelho poroso e em uma cristalária (Sítio da Foto 34). Observa-se que existe uma difusão do cálcio no plasma; bem evidente quando se compara com a imagem do alumínio (Foto 42). Nas cristalárias observa-se que o cálcio está concentrado em algumas zonas formando no centro delas grãos de carbonatos. O teor relativo deste elemento vai diminuindo progressivamente em direção ao plasma.

Foto 39: imagem da distribuição do alumínio. Nesta imagem é possível identificar os espaços ocupados pelos grãos do esqueleto (quartzo principalmente), indicados pela ausência de alumínio. No plasma a distribuição ocorre de modo normal.

Foto 42: imagem da distribuição do alumínio. Observa-se que no contato com as zonas de concentração do cálcio (Foto 41 - C) há uma auréola de redução dos teores de alumínio. Esta auréola corresponde ao plasma amarelado "tenue", com os limites difusos - é o plasma transformado (PT).

Foto 40: imagem da distribuição do ferro. O ferro está acompanhando o alumínio, como faz no plasma original do solo, diminuindo ligeiramente junto às bordas de fissuras.

Foto 43: imagem da distribuição do ferro. Esta imagem mostra claramente que no plasma transformado os teores de ferro são reduzidos.

LEGENDA

CORES	TEORES (faixas - %)
rosa	0 - 14,28
branco	14,29 - 28,57
cinza claro	28,58 - 42,85
cinza escuro	42,86 - 57,14
preto	57,15 - 71,42
azul claro	71,43 - 85,71
azul escuro	85,72 -100,00

Tabela 27: Análises químicas pontuais (microsondagens) - SCC/LE, sítios 1 e 2
Resultados normalizados a 100%.

SÍTIO	PONTO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O
Sítio 1	01	45,93	18,69	16,08	2,99	0,75	11,79	3,40	0,37
	02	48,41	17,20	15,88	4,43	0,50	11,30	2,17	0,12
	03	26,19	20,33	16,32	3,10	0,93	32,34	0,80	0,00
	04	5,63	22,83	21,97	0,91	0,03	45,26	3,36	0,00
	05	25,73	12,12	13,85	11,25	1,95	30,25	4,85	0,00
	06	36,74	10,60	2,97	0,38	2,76	39,40	7,14	0,00
	07	36,74	8,78	25,59	25,31	0,38	2,43	0,78	0,00
	08	41,47	24,16	18,07	4,70	0,62	9,57	1,42	0,00
	09	67,02	16,31	11,85	1,93	0,00	1,53	1,35	0,00
	10	61,84	12,01	7,60	1,02	0,83	15,22	1,48	0,00
	11	55,14	20,12	14,55	2,35	0,34	4,84	2,65	0,00
Sítio 2	01	42,09	30,55	20,71	3,36	0,36	1,72	1,21	0,00
	02	41,42	28,65	22,17	4,83	0,32	1,55	1,06	0,00
	03	29,28	23,27	14,71	5,31	1,24	26,19	0,00	0,00
	04	39,80	27,84	23,97	5,56	0,22	1,90	0,72	0,00
	05	49,88	28,05	17,22	2,84	0,09	1,67	0,25	0,00

Fig. 52: Diagrama triangular do sistema $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ - Segmento SCC/LE

nos diagramas: no primeiro, em direção do pólo cálcico e, no segundo, para o pólo silicoso. Em relação ao plasma original, o plasma transformado é enriquecido em cálcio e empobrecido em alumínio e ferro, principalmente.

Cabe salientar que, dadas as características físicas desse plasma transformado (ou alterado), as dosagens químicas nem sempre puderam ser efetuadas porque as condições ideais para a sua realização não foram alcançadas.

3.4. Segmento CCC

- Micromorfologia

As observações realizadas no campo e complementadas com a lupa e o microscópio óptico, sobre as lâminas delgadas, mostram que esta base é constituída pelos três tipos de materiais: os fragmentos de basalto alterado, com tamanhos superiores a 2,00mm, que se constituem no "cascalho"; agregados de material do solo do subleito incorporado (LR); e um material resultante da mistura do solo e dos produtos de alteração do basalto pulverizados (incluindo fragmentos de basalto < 2,00 mm) com os aditivos, que foi denominada "matriz mista" e que envolve os outros dois materiais (cascalho e agregados), como se observa na Foto 44 (Prancha IX).

Nesta mistura é difícil estimar as quantidade que proporcionalmente ocupam o plasma do solo/matriz mista/cascalho. No topo da camada o cascalho representa entre 50% e 60% (fragmentos milimétricos a centimétricos), enquanto que os agregados de plasma do solo correspondem a aproximadamente 15% a 20%; a "matriz mista" perfaz, aproximadamente, 30% do material neste nível.

Em profundidade, as proporções se mantêm relativamente constantes, variando

apenas na porção inferior da camada, onde os agregados de solo aparecem em maior quantidade. Neste nível também se verifica um aumento de porosidade.

A porosidade é constituída predominantemente por fissuras que aparecem no contato com os grãos de basalto (com estreita faixa de plasma entre a fissura e o grão, às vezes no contato, propriamente), ao redor dos nódulos e dentro dos agregados de plasma do solo (fissuras irregulares com paredes conformes). Na "matriz mista" são mais raras, aqui aparecem, sobretudo as cavidades de formas arredondadas e ovaladas, pequenas (em geral 80 μ de diâmetro). Apenas na parte inferior da camada é que ocorrem os poros de empilhamento.

A fração grosseira (esqueleto) é constituída por poucos grãos de quartzo (proveniente do LR), predominando os fragmentos de basalto alterado, nódulos ferruginosos e grãos de carbonatos. Os grãos de basalto, excetuando-se os maiores (> 2,00mm), apresentam tamanhos que variam de 160 μ a 600 μ e graus variados de alteração. Na "matriz mista" aparecem pequenos grãos, cuja dimensão é da ordem da areia fina e do silte, como se observa na Foto 45 (Prancha IX) obtida com microscopia eletrônica de varredura; muitos deles são grãos de carbonatos.

Os agregados de material do solo são mais ou menos arredondados, constituídos por plasma vermelho-escuro (LN), homogêneo, contínuo, com birrefringência fraca (LP), estrutura plásmica argilassépica - alguns chegam a ser isóticos. Presença de minerais escuros, opacos, e pequenos grãos de quartzo dispersos nesse plasma. Presença de fissuras e ausência de cavidades.

Na "matriz mista" o plasma é menos denso, heterogêneo, vermelho-escuro a vermelho-amarelo (LN) nas bordas das cavidades e entre pequenos volumes ($\pm$ 120 μ) de plasma vermelho mais denso (Fotos 47 e 49, Prancha IX). A estrutura plásmica é argilassépica a silassépica. É nela que estão concentradas as cavidades. Esse material envolve os fragmentos de basalto, agregados de plasma do solo e grãos de carbonatos, e apresenta minerais escuros (aparentemente em maior quantidade que no plasma do solo). Nas Fotos 45 e 46, pode-se observar como se apresentam organizados os componentes da "matriz mista".

PRANCHA IX
SEGMENTO CCC

Foto 44: aspecto geral da mistura cascalho-cal-cimento. Observa-se a presença dos fragmentos líticos do basalto (B), dos volumes de material do solo e a "matriz mista" (Ma) formada pelo pó do basalto alterado, pelo plasma do solo e pelos aditivos - MO.

Foto 47: aspecto da "matriz mista" (com aumento maior) em zona com plasma de solo abundante. C1 indica onde foram realizadas as análises químicas (corte transversal). O corte parte de um volume de solo, atravessa a "matriz mista" e termina sobre um grânulo na borda de uma cavidade. Nesta foto observa-se também a existência de um material branco (PN) preenchendo parcialmente uma fissura (F) no contato entre agregado (solo) e "matriz" - MO.

Foto 45: aspecto da matriz mista ao microscópio eletrônico de varredura. O volume redondo no centro da foto corresponde a um ponto de acúmulo de Ca(OH)_2 - portlandita. Dada a heterogeneidade deste material é difícil identificar modificações ou neoformações. Alguns dos grãos minerais presentes são carbonatos de cálcio (análise química qualitativa).

Foto 48: localização do corte transversal 2 (C2), sobre material incolor dentro de uma cavidade - MO.

Foto 46: aspecto dos agregados de solo - e da sua superfície - que compõem a "matriz mista". Os grânulos no centro da foto são ricos em cálcio - MEV.

Foto 49: localização do corte transversal 3 (C3). Este corte localizado sobre a "matriz mista" atravessa uma cavidade, onde aparecem cristalizações brancas.

Os grãos de carbonatos englobados na "matriz mista", pelas formas (romboédricas) que apresentam, foram incorporados já como grãos à mistura. Indicam que a cal utilizada estava em parte carbonatada.

Observam-se, ainda, pequenos pontos brilhantes (dimensão do siltes) na matriz mista, vistos nas Fotos 47 e 49 (Prancha IX).

Essa mistura não apresenta cristalárias bem desenvolvidas, aparecem apenas algumas pequenas faixas junto a grãos de basalto, ou em pequenas cavidades, com cristalizações somente junto às paredes.

As imagens de raios X (Prancha X) mostram a distribuição do cálcio (50), alumínio (51) e ferro (52) para um sítio de "matriz mista" apresentado na Foto 47 (Prancha IX). Observa-se, da mesma forma que nos casos anteriores, a incompatibilidade do ferro (52) com o cálcio (50), enquanto que o alumínio (51) e o silício participam das novas fases. Verificam-se, também, zonas de "difusão" do cálcio, com áreas centrais mais enriquecidas.

Uma outra seqüência de imagens apresenta (Prancha X), desta vez, a distribuição do cálcio (53), alumínio (54) e ferro (55), num sítio onde predomina o plasma denso do LR em torno de uma cavidade contendo grãos minerais e material incolor, visto na Foto 48 (Prancha IX). Pela imagem de raios X do cálcio percebe-se que este aparece concentrado nos grãos minerais dentro da cavidade e compondo o material incolor que não aparece ao microscópio óptico. Há, também, uma faixa de "difusão" do cálcio na borda da cavidade, indicando reação com plasma, como se observa na imagens do alumínio (54) e do ferro (55).

Nesses sítios foram realizados dois cortes transversais com uma sondagem química a cada 1 μ , um na "matriz mista" (Foto 47, Prancha IX) e outro no interior da cavidade, sobre o material incolor (Foto 48, Prancha IX). Nas fotos é possível ver o traço escuro, deixado pela seqüência de sondagens.

PRANCHA X

SEGMENTO CCC - IMAGENS DE RAIOS X

Foto 50: imagem de distribuição do cálcio (sítio da Foto 47). O cálcio aparece concentrado em cavidades que, na microscopia óptica, parecem vazias. Aparece também relacionado à fissura (recobrimento pelicular).

Foto 53: imagem da distribuição do cálcio (sítio da Foto 48). O cálcio aparece concentrado no grão mineral (carbonato) e no material incolor que preenche a cavidade. Observa-se uma difusão do cálcio para o plasma (faixa estreita).

Foto 51: imagem da distribuição do alumínio. O alumínio aparece mais concentrado nas zonas de ocorrência do plasma do solo. Ocorre também compondo os materiais incolores, ricos em cálcio (Foto 50) presentes nas cavidades.

Foto 54: imagem da distribuição do alumínio. A distribuição do alumínio indica que há uma reação, ao nível das bordas do plasma, com os aditivos.

Foto 52: imagem da distribuição do ferro. Esta imagem mostra que a "matriz mista" é mais empobrecida em ferro.

Foto 55: imagem da distribuição do ferro. A redução do teor de ferro relativo nas bordas confirma a reação do plasma com os aditivos.

LEGENDA

CORES	TEORES (faixas - %)
rosa	0 - 14,28
branco	14,29 - 28,57
cinza claro	28,58 - 42,85
cinza escuro	42,86 - 57,14
preto	57,15 - 71,42
azul claro	71,43 - 85,71
azul escuro	85,72 -100,00

- Transformações e neo-sínteses

Os dados da Tabela 28, plotados no diagrama triangular $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ (Fig. 53), mostram que a maior parte dos pontos está situada numa região empobrecida em cálcio, mas com fases compostas por proporções variadas de alumina e sílica. Esta variação maior de combinações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ é característica da "matriz mista". Neste material também aparecem os pontos alinhados partindo da "matriz mista" para o vértice cálcico, demonstrando a transformação gradual das fases minerais neoformadas, cada vez mais enriquecidas em cálcio e empobrecidas nos outros constituintes, até que sobre apenas carbonato. Este grão é observado, na Foto 47 (Prancha IX), no início do corte transversal (à esquerda). Os gráficos que apresentam as relações CaO e SiO_2 (Fig. 53b) e CaO e Al_2O_3 (Fig. 53c) mostram duas fases distintas: uma provavelmente de transformação, com o enriquecimento em cálcio, manutenção das proporções de alumina e sílica e redução dos teores de ferro; outra de neoformação, onde as fases minerais formadas vão se enriquecendo em cálcio e perdendo gradualmente a sílica e a alumina, até formar o carbonato.

No gráfico da Fig. 54 observa-se a variação dos teores dos principais elementos químicos, ao longo do corte transversal. O MgO , (Fig. 55) apesar de apresentar valores baixos ao longo do corte, mostra uma elevação maior nas zonas de maior concentração do cálcio, com exceção de um local onde a elevação do seu teor está relacionada a fases minerais que constituem a "matriz mista".

As microsondagens realizadas ao longo do corte sobre o material incolor, plotadas no diagrama triangular (Fig. 56), mostram que este é constituído por fases ricas em sílica e que fases contendo predominantemente sílica e cálcio em proporções variadas, abrangem uma ampla gama de combinações que vão desde a sílica pura até ao carbonato de cálcio. Um enxame de pontos indica a presença de C-S-H, com razões CaO/SiO_2 mais baixas (0,8 a 1,33) compreendendo o C-S-H(I) e razões mais elevadas indicativas do C-S-H(II). Vê-se, entretanto, um grupo de pontos isolados que corresponde ao plasma ligeiramente afetado, mas sem desenvolver as fases de transformação

Tabela 28: Análises químicas pontuais (microsondagens) - Segmento CCC, sítios 1 e 2. Resultados normalizados a 100%.

SÍTIO	PONTO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O
Sítio 1	01	72,46	16,53	0,54	0,14	0,33	7,55	0,63	1,81
	02	2,16	1,00	0,16	0,00	0,22	54,79	41,64	0,04
	03	56,66	28,19	5,42	0,62	0,41	7,98	0,24	0,47
	04	37,04	22,02	16,58	2,22	1,20	16,41	4,52	0,00
	05	44,01	24,21	20,22	2,84	0,69	6,73	1,14	0,16
	06	69,25	7,59	6,12	0,65	0,44	11,61	4,08	0,26
	07	65,02	15,08	12,84	2,21	0,19	3,36	0,90	0,40
	08	39,82	15,75	18,28	2,17	1,01	18,96	3,61	0,39
	09	34,42	20,23	22,32	7,31	0,78	13,37	1,25	0,33
	10	49,19	14,76	21,54	4,12	1,01	4,58	3,93	0,88
	11	38,67	23,88	28,70	5,21	0,15	2,40	0,73	0,24
	12	33,54	23,93	30,00	9,15	0,23	2,60	0,51	0,03
Sítio 2	01	37,93	26,36	17,68	2,19	0,72	13,06	2,00	0,05
	02	36,68	25,38	31,95	2,60	0,37	1,29	1,52	0,20
	03	38,75	24,08	23,66	3,55	0,37	5,03	4,41	0,16
	04	50,54	14,77	18,29	10,16	0,32	3,37	1,66	0,89
	05	39,61	29,75	24,87	3,48	0,00	1,45	0,72	0,13
	06	19,78	1,53	0,53	0,15	0,33	51,39	26,28	0,00
	07	45,03	9,88	1,13	0,18	0,79	13,57	29,14	0,29
	08	42,14	29,60	20,79	2,75	0,41	2,49	1,63	0,20
	09	38,25	22,76	22,83	3,89	0,70	8,69	2,59	0,29
	10	31,94	23,68	35,34	6,41	0,00	1,38	1,05	0,20
	11	29,62	22,83	16,27	2,33	0,95	24,45	3,52	0,04
	12	39,68	28,34	24,29	3,92	0,06	1,54	1,97	0,22
	13	43,66	10,29	4,86	0,38	1,30	10,49	28,76	0,27
	14	39,20	29,14	23,81	3,00	0,23	2,76	1,76	0,11

Fig. 54: Variação da composição química da "matriz mista" ao longo do corte transversal 1 - CCC (sítio 1).

Fig. 55: Distribuição do CaO e MgO ao longo do corte transversal 1 - CCC.

Fig. 56: Análises químicas pontuais ao longo de corte transversal sobre material "incolor" preenchendo cavidade - CCC, corte 2 (sítio 2).

- a) Diagrama triangular sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$
- b) Relações entre o teor de CaO e SiO_2
- c) Relações entre o teor de CaO e Al_2O_3

de transformação intermediárias. Nos gráficos $\text{CaO} \times \text{SiO}_2$ (Fig. 56a) e $\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$ (Fig. 56b), fica evidente a reação entre a sílica e o cálcio, gerando as fases C-S-H e as fases carbonáticas. O alumínio, em pequenas proporções, se mantém praticamente constante ao longo das reações.

Um outro corte transversal foi realizado manualmente (isto é, as distâncias entre os pontos sondados não foram uniformes) sobre a "matriz mista", atravessando uma pequena cavidade. Na Foto 49 (Prancha IX), é possível acompanhar o corte realizado (traço horizontal escuro).

No gráfico triangular da Fig. 57, observam-se uma zona de pontos com composição mais próxima da do plasma do solo; uma com fases transformadas e neoformadas, mais empobrecidas em sílica do que em alumina.

3.5. Segmento CC

Esta mistura apresenta as mesmas características daquelas observadas na mistura CCC, como se pode observar nas Fotos 56 e 57 (Prancha XI).

O esqueleto da "matriz mista" é formado por grãos de quartzo e minerais escuros, oriundos do material do solo, e fragmentos de basalto alterado com tamanhos compreendidos em média entre 0,60 e 0,80mm - podem ocorrer alguns grãos maiores, variando entre 1,5 e 2,00mm - e grãos de carbonatos em quantidade superior aos grãos de quartzo, com tamanhos que podem chegar a 0,28mm. Os carbonatos aparecem englobados na matriz mista e dentro de vazios.

Os grãos de basalto alterado dentro da "matriz mista" apresentam graus diferentes de alteração. Há presença de elementos típicos isolados, que se observam também nos fragmentos maiores: esferulitos zonados, com auréola externa amarelo-clara e círculo

PRANCHA XI
SEGMENTO CC

Foto 56: aspecto geral da mistura cascalho-cal. Observam-se na foto os fragmentos líticos de basalto alterado (B) - o fragmento a esquerda exibe o córtex de alteração - volumes de material do solo (S) e a "matriz mista" (Ma) - MO.

Foto 57: detalhe da organização da "matriz mista" em zona onde domina o material do solo. Observa-se a gradação do plasma vermelho-escuro denso para zonas de plasma mais claro, poroso e pontuado de pequenos grãos brancos. Neste plasma aparecem as cavidades - MO.

Foto 58: "matriz mista" vista em microscopia eletrônica de varredura. Aparece formada por pequenos "grãos" e agregados (volumes de plasma.)

Foto 59: imagem de raios X da distribuição do cálcio (sítio mostrado na Foto 57). Observa-se que o cálcio se distribui em forma de pequenos pontos na "matriz". As concentrações maiores (em azul) correspondem a grãos de carbonato, visíveis na Foto 57 - como aquele de forma triangular, a esquerda, abaixo de um nódulo ferruginoso. A imagem de distribuição do cálcio indica que os pontos brancos e branco-amarelados vistos na "matriz" correspondem a pontos de concentração de cálcio. Estes pontos estão distribuídos nas bordas dos volumes de plasma.

Foto 60: imagem da distribuição do alumínio. Verifica-se que as bordas dos volumes de plasma são mais pobres em alumínio ("matriz").

Foto 61: imagem de distribuição do ferro. Excetuando-se as zonas de concentração (nódulos e minerais), o ferro acompanha a distribuição do alumínio.

LEGENDA

CORES	TEORES (faixas - %)
rosa	0 - 14,28
branco	14,29 - 28,57
cinza claro	28,58 - 42,85
cinza escuro	42,86 - 57,14
preto	57,15 - 71,42
azul claro	71,43 - 85,71
azul escuro	85,72 -100,00

interno bruno-ocre; fragmentos desses esferulitos disseminados na "matriz"; fragmentos muito alterados, ferruginizados, com "box-work" (armação) característica, etc...

Nas lâminas delgadas observa-se, em todos os níveis (topo, centro e parte inferior), a existência de fissuras finas que se localizam em torno dos fragmentos de basalto (cascalho), dos volumes arredondados de plasma de solo mais contínuo (são mais freqüentes nestas condições) e dentro destes; são fissuras retas e de paredes conformes. Aparecem também poros cavitários, de tamanhos e formas variados, mais geralmente ovalados, às vezes interconectados entre si e com as fissuras. Localizam-se preferencialmente na "matriz mista".

O plasma dos agregados é vermelho-escuro, homogêneo e denso, com birrefringência muito fraca, argilassépico.

Na "matriz mista" o plasma é vermelho-amarelado (LN), menos denso principalmente no contato com os grãos do esqueleto (aí ele também é mais claro), com birrefringência fraca, argilassépico. Presença de algumas áreas com extinção em rosetas (avermelhadas), pontos claros, brancos e amarelados, estes, concentrados em torno das cavidades (Foto 57, Prancha XI). A Foto 58 (Prancha XI) mostra o aspecto geral da "matriz mista" visto ao microscópio eletrônico de varredura.

Na Prancha XI é apresentada a seqüência de imagens de raios X (Fotos 59, 60 e 61) referentes ao sítio da Foto 57 (Prancha XI). Observa-se, através da imagem do cálcio (59), a sua distribuição nas bordas das cavidades, com difusão (pequena) no plasma, e a concentração no interior, formando grãos de carbonatos.

Os dados obtidos com as microsondagens estão apresentados na Tabela 29 e plotados nos diagramas triangulares da Fig. 58. No diagrama do sistema $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ a maioria dos pontos está situada no campo de composição da "matriz mista" e apenas alguns pontos situam-se no campo das neo-sínteses. No diagrama do sistema $\text{CaO} + \text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$, observa-se que os pontos referentes às neo-sínteses não alteram as suas posições, indicando que são produtos gerados apenas pela reação com o cálcio. Entretanto, muitos pontos da "matriz mista" se deslocam, mostrando a presença

Tabela 29: Análises químicas pontuais (microsondagens) -Segmento CC

SÍTIO	PONTO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O
Sítio 1	01	16,32	14,34	66,67	2,00	0,06	0,11	0,45	0,06
	02	34,44	10,24	51,62	2,51	0,40	0,24	0,56	0,00
	03	42,06	26,63	26,35	3,74	0,38	0,50	0,24	0,10
	04	47,70	21,73	22,19	7,83	0,00	0,38	0,00	0,18
	05	17,59	1,88	76,48	3,43	0,25	0,25	0,03	0,10
	06	44,32	27,13	22,03	3,87	0,39	0,86	0,99	0,40
	07	42,12	24,70	24,53	6,63	0,30	0,58	0,71	0,44
	08	33,31	24,84	32,79	7,60	0,01	0,33	0,78	0,34
	09	42,56	26,39	25,16	4,55	0,14	0,43	0,54	0,23
	10	57,25	6,01	27,37	0,10	0,22	0,33	3,70	3,70
	11	34,73	27,79	29,14	7,11	0,18	0,26	0,71	0,09
	12	39,87	14,60	32,87	6,54	0,31	0,82	1,96	3,03
	13	34,14	28,49	29,00	7,85	0,00	0,13	0,21	0,18
	14	35,81	28,90	29,91	4,35	0,31	0,21	0,33	0,17
	15	33,21	25,62	33,54	6,26	0,31	0,31	0,64	0,12
Sítio 2	01	11,38	13,42	72,19	2,47	0,00	0,35	0,17	0,01
	02	7,77	10,81	78,74	1,28	0,22	0,35	0,74	0,09
	03	14,39	9,10	5,07	0,56	0,51	65,26	5,08	0,04
	04	12,41	5,89	7,12	1,57	0,40	68,89	3,65	0,05
	05	45,20	25,77	22,45	3,61	0,19	1,91	0,75	0,11
	06	35,79	21,74	31,33	8,01	0,19	1,43	1,33	0,18
	07	8,12	3,70	2,81	0,20	0,35	79,47	5,23	0,13
	08	42,57	22,41	29,07	3,28	0,05	1,12	1,16	0,34
	09	26,09	16,58	11,44	1,56	0,43	41,79	2,11	0,00
	10	56,67	7,35	8,16	2,15	0,22	24,75	0,42	0,28
	11	74,34	7,11	9,40	2,03	0,32	5,76	0,69	0,34
	12	37,82	23,77	18,35	17,11	0,30	0,98	1,24	0,43
	13	44,32	27,49	23,10	2,17	0,28	0,93	1,25	0,45
	14	9,85	3,14	3,50	0,43	0,24	80,90	1,94	0,00
	15	39,02	27,23	21,60	10,41	0,00	0,76	0,73	0,24

Fig. 58: Análises químicas pontuais do segmento com base cascalho cal (CC).

- a) Diagrama triangular do sistema $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$
- b) Diagrama triangular do sistema $\text{CaO} + \text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$

de magnésio na sua composição e indicando a sua origem - basalto alterado. O grupo de pontos que permaneceu agrupado corresponde aos agregados de solo.

3.6. Síntese dos resultados

Todos os pontos dos segmentos com base solo-cal-cimento apresentam uma porosidade mais reduzida na parte superior da camada e maior do centro para a parte inferior. Essa porosidade é preferencialmente formada por fissuras paralelas, horizontais, cavidades arredondadas e, em alguns casos (SCC/LR 1), por poros de empilhamento. Além dos grãos de quartzo e minerais escuros que formam o esqueleto do solo utilizado na mistura (raro para o LR e mais abundante para o LE), aparecem grãos de carbonatos, que são, contudo, mais abundantes na mistura tratada com cal dolomítica. Muitos desses grãos de carbonatos, principalmente no segmento SCC/LR 2, apresentam formas cristalinas definidas, romboédricas, e têm dimensões similares às daquelas do quartzo, o que leva a supor que já existiam na cal antes da mistura com o solo.

Na análise micromorfológica o que mais chama a atenção, entretanto, são as modificações nas características dos plasmas dos solos utilizados nas misturas. É freqüente em todas as amostras a ocorrência de dois tipos de plasma: um é vermelho-escuro vivo, denso, em geral massépico (nos volumes maiores) ou argilassépico (nos volumes menores), onde se desenvolvem preferencialmente as fissuras finas, que aparece como agregados individuais ou volumes bem diferenciados dentro de outro plasma; o outro é vermelho mais claro e freqüentemente vermelho-amarelo, menos denso, silassépico a poro-silassépico, com porosidade elevada - formada principalmente por cavidades arredondadas, às vezes interconectadas - que envolve ou engloba os agregados ou volumes de plasma mais denso.

A freqüência do plasma vermelho-amarelado, silassépico, é variável de segmento

para segmento. Abundante no SCC/LR 1, transforma-se no SCC/LR 2 - mistura solo/cimento/cal (cal magnésiana) - em pequenas áreas dentro de zonas maiores e contínuas de plasma vermelho-escuro.

É neste plasma, também, que se observa a presença de pequenos grãos (dimensão do silte) brancos, amarelados, brilhantes - inexistentes no material original -, mais concentrados junto às bordas dos vazios.

Dentro de alguns vazios ocorrem assembléias cristalinas, cujos minerais situados nas bordas, no contato com o plasma vermelho-amarelo, são mais amarelados e, mais próximo ao centro do vazio tornam-se mais brancos e brilhantes - são as "cristalárias". Em algumas cristalárias observa-se a presença de pequenos grãos "compactos" de tonalidades iridescentes; são carbonatos que, neste caso, se formam na mistura. As cristalárias ocorrem em vazios de vários tamanhos.

Observam-se, ainda, modificações a partir do topo para a base da camada, na porosidade (tipo e freqüência) e na participação relativa do plasma vermelho-escuro e do plasma vermelho-amarelo, assim como das cristalárias, que podem aparecer mais concentradas em determinados níveis do que em outros.

As observações micromorfológicas de fragmentos realizadas ao microscópio eletrônico de varredura permitiram, igualmente, caracterizar a porosidade, os plasmas e as cristalárias. Os produtos de hidratação do cimento ou de reação da cal com os constituintes do solo, que formam as cristalárias, aparecem concentrados nos vazios e bordas de vazios e apresentam-se com várias formas e tamanhos: cristais em forma de agulhas finas, pequenas, flexíveis; cristais aciculares nitidamente mais longos e espessos; folhas hexagonais e flexíveis; ou ainda como grânulos pequenos, etc., que correspondem aos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminossilicatos de cálcio hidratados (CASH), sulfoaluminatos e outras fases mais carbonatadas.

Os dados químicos indicam que efetivamente ocorrem reações que incluem os constituintes do plasma, promovendo transformações com o surgimento de uma série de produtos intermediários entre aqueles do plasma original e os produtos de neo-sínteses

e da hidratação do cimento conhecidos.

As observações feitas ao microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura permitiram, portanto, considerar a ocorrência de um plasma menos atacado (ou preservado) e de um plasma alterado, onde os constituintes do plasma original sofreram transformações graduais, chegando a produzir, em combinação com os aditivos (Ca(OH)_2 preferencialmente), novos produtos.

As misturas solo-cal-cimento se caracterizam, portanto, por apresentar agregados (ou zonas) de plasma não afetados ou pouco afetados pelos aditivos, mais sensíveis às variações e esforços de origem hídrica e mecânica (denunciados pela presença de fissuras) e instáveis. Estão envolvidos por plasma transformado por reações com os aditivos em diversos graus, contendo os produtos de hidratação do cimento e de reação pozolânica da cal, menos sensível às variações hídricas e mecânicas (sem fissuras), e mais resistente.

Este tipo de organização tem se mostrado capaz de manter o conjunto estável, principalmente no que se refere à ação da água (os fragmentos não se desagregam dentro d'água).

Observa-se, contudo, que na base onde foi empregada a cal magnesiana, apesar da presença do cimento, ainda que aquém do estipulado pelo projeto, predomina o plasma não transformado e, portanto, instável e menos resistente. Este comportamento ficou evidente na facilidade de fragmentação da base e na desagregação total quando fragmentos foram imersos em água. Este fato pode estar relacionado tanto à natureza química da cal (teor mais baixo de elemento reativo - o cálcio) quanto à sua qualidade de produção e conservação. Neste material há fortes indícios de carbonatação prévia da cal, o que a torna menos reativa.

Por outro lado, apesar da aplicação de teores mais baixos de aditivos, o Latossolo Vermelho-escuro, alcançou a estabilidade.

Nas misturas com cascalho de basalto alterado foi a "matriz mista", gerada pela incorporação do solo e dos produtos do córtex de alteração do basalto, o material que

se misturou e reagiu com os aditivos.

A adição apenas de cal não produziu os mesmos efeitos da adição conjunta de cal + cimento. A mistura cascalho-cal-cimento se mostrou mais estável (não desagregou dentro d'água) do que a cascalho-cal.

Capítulo VI

AS TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO E O PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como foi visto no Capítulo II, os princípios da estabilização de solos com cal diferem em alguns aspectos daqueles da estabilização com cimento. A cal atua exclusivamente através de reações químicas e físico-químicas (reações pozolânicas) desencadeadas entre o aditivo e os constituintes dos solos. Neste processo há a alteração de propriedades de superfície dos minerais (que interferem diretamente no seu arranjo e comportamento hídrico e mecânico) e geração de novos produtos com propriedades cimentantes (NÓBREGA, 1988).

O cimento, de acordo com KÉZDI (1979), conta primordialmente com a formação de minerais com propriedades ligantes produzidos a partir da sua hidratação e, secundariamente, com a ação do excesso de Ca(OH)_2 - portlandita. Segundo MEHTA (1986) o volume sólido produzido na hidratação (pasta de cimento) é constituído de 50% a 60% de C-S-H; 15% a 20% de sulfoaluminatos de cálcio hidratados e 20% a 25% de Ca(OH)_2 . Assim, na estabilização solo-cimento o processo de hidratação gera também uma quantidade de cal - Ca(OH)_2 - que é responsável por reações químicas e físico-químicas com os constituintes minerais (argilosos) dos solos.

Pode-se dizer, portanto, que a cal e o cimento desempenham na estabilização papéis complementares: o cimento garante a produção dos constituintes cimentantes e a cal adicionada, mais aquela produzida na hidratação, promovem as modificações das propriedades físicas das argilas e geram, através das reações pozolânicas, mais produtos cimentantes.

Vários fatores, como foi visto inicialmente, interferem no processo de estabilização seja com a cal ou com o cimento: a mineralogia e a textura do material; a composição química da cal; os teores (cal ou cimento) aplicados; a homogeneização da mistura

(aditivos e umidade), as condições de cura (tempo e temperatura), etc.

Considerando-se os resultados obtidos na pesquisa serão discutidas, neste capítulo, a influência dos diversos fatores na organização e comportamento das misturas e a natureza das reações desencadeadas.

1. OS FATORES CONDICIONANTES

Destacam-se dois grupos de fatores condicionantes da estabilização: aqueles que dizem respeito à natureza química e mineralógica dos materiais estabilizados e dos aditivos; e aqueles que estão diretamente vinculados às técnicas de preparação da mistura e construção da base.

1.1. Natureza química e mineralógica dos materiais e dos aditivos

Nos segmentos pesquisados foram empregados três materiais diferentes: o Latossolo Roxo, o Latossolo Vermelho-escuro e o cascalho de basalto alterado.

O Latossolo Roxo e o Latossolo Vermelho-escuro, ambos de textura argilosa, apresentam uma pequena variação nos teores de argila (74% e 55% de argila, respectivamente) e que se reflete na existência de um esqueleto mais abundante no LE.

Em termos de composição mineralógica os dois solos apresentam um elenco semelhante de minerais compondo a fração argila (fração ativa): caulinita e hematita predominantemente. A gibbsita praticamente só ocorre no LR e em pequena quantidade.

Entretanto a organização natural que esses solos apresentam indica que há uma imobilização maior da caulinita no LR do que no LE. Essa imobilização exercida pelo ferro (CHAUVEL et al., 1976), é evidenciada pela organização em micronódulos e pelo plasma isotrópico. No LE os microagregados possuem formas irregulares e o plasma apresenta separações plásmicas (indícios de reorganização), denunciando uma certa atividade. Por outro lado, nas bordas dos agregados, tanto no LR quanto no LE, aparece uma faixa de plasma mais claro (mais abundante no LE), mais rico em sílica e empobrecido em alumínio e ferro se comparado com o plasma vermelho-escuro que compõe a massa principal dos agregados. NÓBREGA (1988) observou, em misturas preparadas em laboratório, que estes dois tipos de solos reagiram bem à estabilização com a cal, mas de formas diferentes. No LR houve a manutenção dos microagregados na mistura compactada e os produtos de neoformação ocorreram na superfície dos agregados, formando cristalárias, principalmente em função da reação da cal com o hidróxido de alumínio (gibbsita). No LE, ao contrário, os microagregados foram deformados, dando origem a um material contínuo onde as zonas de plasma mais vermelho e mais denso eram envolvidas por zonas de plasma mais amarelo e poroso. No plasma amarelo ocorreram as reações dos constituintes do plasma original com a cal, formando principalmente uma fase reticulada, característica de C-S-H. Estes resultados mostraram que além da mineralogia é importante a forma de organização dos constituintes. Esta organização original também influencia os novos arranjos promovidos pela compactação e a disponibilidade dos constituintes originais do solo para as reações com os aditivos.

Esta influência aparece nas misturas estabilizadas dos segmentos SCC/LR 1 e SCC/LE, onde foram utilizados cal cálcica + cimento, mas em proporções diferentes: no SCC/LR 1 aparecem volumes de plasma vermelho-escuro arredondados ou de formas irregulares bem delimitados envolvidos por plasma mais claro (Pranchas III, IV e V) - há uma manutenção maior dos microagregados nas áreas com aditivos; no SCC/LE, o plasma vermelho-escuro (volumes) se transforma gradualmente em plasma mais claro (Prancha VII e VIII). O plasma claro exhibe sinais claros de transformação, como mostraram as imagens de raios X e a microscopia eletrônica de varredura.

Conclui-se, portanto, que a fração argila (plasma) do LE reage mais facilmente aos

aditivos do que a do LR. O esqueleto mais abundante no LE também contribui para melhorar a "armação" (sustentação) do material compactado.

Nas misturas com cascalho de basalto alterado, as observações realizadas mostram que se trata efetivamente de uma mistura de cascalho de basalto alterado + solo (do subleito - LR) + aditivos. Este material apresenta uma complexidade mineralógica maior incluindo, além daquela do LR, vários outros minerais em diferentes estágios de transformação e substâncias amorfas (como o vidro, por exemplo). Segundo MONTVENOUX & GEOFFRAY (1975) a composição química do basalto é muito vizinha daquela das pozolanas e quando moído reage muito bem com a cal. Chega a apresentar "pozolanicidade" superior a de certas pozolanas naturais.

As observações morfológicas mostraram que essas misturas são compostas por fragmentos de basalto (que dão a sustentação física ao material), por volumes de material do solo do subleito e por uma "matriz", formada pelo material do córtex de alteração do basalto pulverizado e fragmentos menores de basalto misturados com o plasma do solo e os aditivos. É essa "matriz mista" que preferencialmente reage aos aditivos (cal ou cal+cimento). Nas duas misturas com cascalho analisadas observou-se uma diferença com relação ao grau de alteração do cascalho de basalto empregado. Na mistura CC os fragmentos apresentam-se mais alterados do que na mistura CCC. Essa diferença se traduziu em uma "matriz mista" mais rica em produtos do córtex de alteração do basalto e de fragmentos menores (triturados pelo tráfego) do que a outra. Considerando-se a possibilidade de uma maior ocorrência de materiais com propriedades pozolânicas (substâncias amorfas, vidro) fornecidos pelo basalto, a "matriz mista" da mistura CC, seria potencialmente mais reativa com os aditivos do que a da mistura CCC.

Com relação à natureza química dos aditivos, nesta pesquisa, foram analisadas misturas que empregaram dois tipos de cales: a cal cálcica e a cal dolomítica. O cimento utilizado foi fornecido por um único fabricante.

A cal dolomítica, como mostram os dados da sua composição química (Capit. III - Tabela 9) apresentou alto teor de CaO insolúvel (não reativo). Nas misturas onde foi empregada constatou-se a presença de grãos de carbonatos, da dimensão dos grãos do

esqueleto, incorporados já como grãos, indicando que a cal se apresentava parcialmente carbonatada quando foi adicionada. Nesse caso além da diferença da natureza química da cal, uma adicionando Ca(OH)_2 a outra $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$, há também a diferença da qualidade.

Em dois segmentos, SCC/LR 1 e SCC/LR 2, o Latossolo Roxo foi empregado: no primeiro em mistura com 5% de cimento + 4% de cal cálcica; no segundo em mistura com 5% de cimento + 4% de cal dolomítica. As duas misturas apresentaram arranjos e comportamento diferenciados. No SCC/LR 1 as reações com os constituintes do solo foram mais intensas, apresentando um plasma poroso rico em produtos de hidratação e de reação pozolânica, resistente e estável. No SCC/LR 2, as transformações foram muito localizadas e restritas às bordas dos volumes de plasma vermelho denso, predominando, portanto o plasma original do solo, pouco afetado. As reações ocorrem apenas ao nível das bordas, criando uma "franja" microgranulada marcando o contato entre os agregados, como se observou em MEV, Prancha VI. A mistura resultante se mostrou menos resistente (mais frágil) e sensível à ação da água (se desagregou dentro d'água).

Na mistura com cascalho (CC) foi aplicada apenas cal - 5% de cal dolomítica. Essa mistura também apresenta grãos de carbonatos incorporados, entretanto apenas a parte inferior da camada apresentou sensibilidade a ação da água.

Os dados obtidos pelo acompanhamento do comportamento da pista realizado pelo DER-PR mostram que os segmentos onde foi empregada a cal dolomítica (SCC/LR 2 e CC) apresentam mais defeitos (defeitos que comprometem o desempenho da base: deformação plástica). Apresentam também os dados de raio de curvatura e produto R_d mais baixos entre os segmentos estudados, denunciando uma possibilidade maior de problemas no comportamento estrutural do pavimento.

1.2. Os efeitos das técnicas de construção

As reações de hidratação do cimento e pozolânicas são desencadeadas em presença de água. A hidratação do cimento consome, de acordo com INGLES & METCALF (1972), o equivalente a 1/4 do peso do cimento empregado. Por outro lado, as reações da cal com os constituintes do solo são também favorecidas pelo aumento da umidade, como observaram PERRET (1977) e ESTEOULE & PERRET (1979): "uma umidade importante do material permite à cal desenvolver melhor as suas potencialidades".

Além do teor de umidade, a homogeneização dessa umidade e do aditivo (ou aditivos) na mistura podem influenciar o processo de estabilização. Problemas na homogeneização significam variações nos teores de água e de aditivos e, conseqüentemente, do resultado final.

Grande parte dos fatores que interferem nos processos de estabilização com cal ou com cimento, atuam durante a construção das pistas. Nessa ocasião surgem variáveis dificilmente controláveis e não previstas em laboratório, capazes de influenciar o processo de estabilização tanto beneficamente quanto prejudicialmente. Entre as variáveis possíveis ressaltam-se:

- 1) A temperatura em condições de pista é muito diferente daquela a que as amostras foram submetidas em laboratório. Duas situações opostas ocorrem:
 - temperaturas mais frias na época da construção que implicam em reações solo-cal mais lentas. Sob temperaturas abaixo de 16°C essas reações praticamente cessam - prejudicial para a aplicação;
 - temperaturas muito mais altas na época da construção - as reações solo-cal são aceleradas, efeito benéfico para a aplicação. Contudo, nestas condições, as operações de mistura e compactação devem

ser mais rápidas para não se perder esse efeito.

- 2) Granulometria do material da pista é diferente daquele ensaiado em laboratório. Na pista admite-se material com 60% passando na peneira de 4,75mm, no laboratório usa-se material passando 100% na peneira de 2,00mm. Estas diferenças vão aparecer ao nível de incorporação da cal e do cimento pelas partículas do solo - será mais íntima e homogênea nas amostras tratadas em laboratório.
- 3) Aplicação da cal e do cimento - em laboratório a aplicação da cal e do cimento é perfeitamente controlada, tanto em termos de teor (pesagem) quanto de mistura (não há perdas). Na pista a aplicação do teor de cal e de cimento não é precisa porque nem sempre é observado, de forma rígida, o padrão geométrico de distribuição; muitos sacos rasgam-se no transporte perdendo-se, assim, uma quantidade de aditivos; na etapa de mistura e homogeneização ocorre sempre uma perda dos aditivos, seja nas laterais da pista - jogada fora pelos equipamentos - seja pela ação do vento.

OBS. - para minimizar essas perdas se recomenda a aplicação de 1% a mais de aditivos em relação à dosagem indicada pelos ensaios de laboratório;

- com relação à cal, observa-se também que podem ocorrer problemas com o seu armazenamento. A cal deve ficar protegida das intempéries e armazenada durante pouco tempo, senão pode se carbonatar (perdendo assim reatividade) e comprometer a estabilização. Para evitar esses problemas deve-se fazer um controle químico frequente da cal que está sendo utilizada na pista.

- 4) Tempo de demora entre a mistura da cal e do cimento ao solo e a compactação - experiências em laboratório têm demonstrado que, a partir de um determinado tempo de espera entre a mistura da cal e/ou cimento e a compactação, começa haver perda na resistência final obtida. Deve-se lembrar, ainda que a temperatura

vigente na etapa de construção pode diminuir ou dilatar esse tempo. Essas variações introduzidas nessa fase podem ser controladas, em parte, por uma programação racional de uso dos equipamentos e das extensões dos trechos executados. Quebras de equipamentos podem prejudicar o ritmo da execução e interferir, posteriormente, no grau de compactação obtido, como se tem verificado muitas vezes. Enquanto ocorre a espera entre a mistura e a compactação, as reações ocorrem numa velocidade comandada pela temperatura e teor de umidade existente no material, modificando as suas características em níveis diferentes daqueles observados no laboratório - mudanças no teor ótimo de umidade de compactação e na densidade aparente máxima.

- 5) Compactação - os equipamentos de compactação, usados na pista, aplicam a energia na mistura de forma diferente daqueles usados em laboratório. Este fato, por si só, pode gerar estruturas diferentes nos materiais compactados. Em geral para facilitar a compactação da mistura são utilizados equipamentos vibratórios. Estes equipamentos tendem a orientar os materiais argilosos e siltosos dando origem a um processo de lamelação que compromete a estabilização.
- 6) Cura - para se obter boas condições de cura deve-se evitar o tráfego sobre a camada construída (o que nem sempre é possível) e a perda de umidade por evaporação. Essa perda é evitada com o uso de imprimações betuminosas sobre a superfície, mas é necessário ainda se encontrar o tipo mais eficaz particularmente para o solo-cal. A perda de umidade implica em bloqueio das reações solo-cal e favorecimento da carbonatação da cal nos primeiros centímetros da camada estabilizada, formando as películas e depósitos superficiais. Ocorre, em função disto, uma descamação da superfície comprometendo a aderência da capa asfáltica sobre a base.

- Os efeitos diretos das técnicas de construção nas misturas

As observações morfológicas realizadas em todos os níveis e complementadas pelas imagens de raios-X dos principais elementos químicos que compõem o material, e pelas análises químicas, sugerem algumas relações com as condições de execução da pista:

- a diferenciação vertical da porosidade, tanto em termos de área, quanto de forma, indica que a compactação não foi homogênea ao longo da camada. Ela foi mais eficiente na parte superior e deficitária na porção inferior. Em termos mecânicos, este fato, implica em transmissão deficiente dos esforços a partir da superfície para os níveis subjacentes da estrutura da estrada, e pode ser o responsável pelos valores relativamente elevados de deflexão que foram observados;

- a variação na forma e tamanho das unidades morfológicas (agregados) e na distribuição dos aditivos, ao longo da espessura da camada, indica que a mistura e homogeneização não foi uniforme. Foram, assim, geradas zonas mais ricas em aditivos na parte superior e central da camada, e zonas mais pobres na parte inferior. Na mistura SCC/LR 2, o cálcio total dosado na mistura é muito inferior àquele previsto pela dosagem do projeto.

- a mesma deficiência de homogeneização ocorreu para a umidade. As porções inferiores da base ficaram menos umidecidas e isto interferiu no desencadeamento e desenvolvimento das reações com os aditivos. Esta situação está bem evidenciada no segmento SCC/LR 1, onde aparece o aspecto de mosaico. A deficiência hídrica limita a difusão do cálcio e, conseqüentemente as reações com os constituintes do plasma. O processo de hidratação do cimento também é afetado. Na mistura CC, os dados do controle tecnológico do DER-PR, mostram que o teor total de umidade da mistura estava muito abaixo do teor ótimo e as imagens de raios X indicam que, apesar de presente no teor estipulado, o cálcio reagiu pouco com os constituintes da "matriz mista", se carbonatando em conseqüência;

- as fissuras recobertas por películas brancas, foram formadas logo após a construção, provavelmente no período de cura e por perda de umidade da base. A localização (topo da camada) e morfologia das películas brancas de recobrimento indicam que estas se formaram a partir da ascensão de soluções ricas em cálcio, por efeito de evaporação. Este fato mostra que a imprimação não foi suficiente para evitar as perdas de umidade e garantir água necessária às reações tanto de hidratação do cimento, quanto as pozolânicas.

2. NATUREZA DAS REAÇÕES DESENCADEADAS

A morfologia das misturas indica que mudam de imediato as características físico-químicas das partículas (simples ou compostas) constituintes do material.

Nas misturas solo-cal-cimento, os microagregados (tanto aqueles do LR quanto do LE), onde não há evidências da presença de aditivos, são deformados sob o efeito da compactação. Os poros originalmente interagregados se transformam, nessas zonas, em poros planares irregulares (*craze planes*) e cavidades. O plasma aparece contínuo e orientado exibindo, nas zonas maiores, separações plásmicas estriadas. A estrutura plásmica originalmente isótica ou argilassépica transforma-se em massépica. As separações plásmicas estriadas e inclinadas, como aquelas que aparecem nas Pranchas III e VII, foram interpretadas por vários autores como resultantes de forças de cisalhamento. De acordo com JIM (1986) esse esforço plástico leva à formação de um número de microplanos de cisalhamento, ao longo dos quais os domínios argilosos se alinham formando as separações plásmicas. Em microscopia óptica, Luz Natural, essas zonas de plasma denso, contínuo e orientado, exibem uma série de pequenas fissuras paralelas e inclinadas. O esqueleto quando relativamente abundante, como no LE, aparece concentrado e orientado segundo linhas também determinadas pelos esforços aplicados.

Nas zonas onde o aditivo está presente, a organização que prevalece é a de microagregados que podem estar "soldados" ou não por um plasma mais claro contínuo. É a zona onde aparece preferencialmente a porosidade cavitária e interagregada. Este fato indica que de imediato se estabelecem reações entre os aditivos e os constituintes do solo, que criam ou preservam as organizações particulares.

A água adicionada, nesta zona, se satura em íons cálcio alterando as suas propriedades. Aparentemente essa mudança físico-química da água - traduzida por modificação do potencial osmótico e do pH - aparentemente impede a sua penetração nos microporos intragregados, permanecendo retida ao nível das bordas. Sem a lubrificação interna os agregados são mais facilmente preservados.

Nas bordas, como foi visto, o plasma nos dois tipos de solos é mais pobre em ferro e alumínio e rico em sílica. Está, em termos hídricos e mecânicos menos "inibido" pela ação do ferro. Nas imagens de raios X da distribuição do cálcio, oriundo da cal ou do cimento, verificou-se uma incompatibilidade com o ferro: o cálcio só começa a se concentrar a partir de determinados teores de ferro. Nas bordas dos agregados onde houve reação, há uma auréola de redução dos teores relativos de ferro.

PERRET (1977) e ESTÉOULE & PERRET (1979) constataram a influência do ferro no desencadeamento do processo de estabilização com a cal. Segundo os autores a reação do Ca(OH)_2 com os constituintes argilosos dos solos ocorre através de fases sucessivas envolvendo mecanismos químicos diferentes:

- na primeira fase o hidróxido de cálcio se hidrata e passa em solução. Tendo em vista os baixos teores de umidade envolvidos, a saturação é rapidamente alcançada;
- na etapa seguinte, a elevação do pH devido à hidrólise do hidróxido de cálcio, precipita o ferro livre e esses precipitados férricos formam entorno dos grãos de cal uma barreira que impede a difusão dos íons oxidroxila e cálcio. Essa barreira só é ultrapassada após o ataque e reação total com o hidróxido de cálcio;
- somente depois que todo o hidróxido ferríco reagir é que a difusão dos íons

oxidrila e cálcio, a partir dos grãos de cal, poderá ocorrer livremente em todo o material e ter início a segunda fase de estabilização.

Assim, de acordo com o esquema dos autores citados, há a necessidade de redução ou mobilização do ferro para que as reações envolvam os outros minerais.

Nas misturas estudadas na pesquisa verificou-se a redução gradual do ferro a partir do plasma vermelho-escuro, denso, menos atacado pelos aditivos, por todo o plasma vermelho-amarelo ou vermelho-claro até praticamente desaparecer nos produtos neoformados, silicatos e aluminossilicatos de cálcio hidratados.

A redução do teor de ferro e aumento do teor de cálcio esta associada ao surgimento do plasma transformado, onde os argilo-minerais se reorganizam e participam das reações. Nessas zonas o plasma aparece com limites difusos em direção aos poros.

Embora as análises por difração de raios X e por infravermelho não tenham contribuído para a identificação mais eficiente das fases neoformadas, elas evidenciaram uma diminuição significativa do grau de cristalinidade da caulinita (aumento da desordem) e o desaparecimento da gibbsita (no LR) nos materiais e organizações mais ricos em cálcio.

Segundo LE ROUX (1969) ocorre um ataque pela cal (dissociada pela água em Ca^{++} e OH^-) das partículas argilosas e a formação de um cimento de aluminatos e de silicatos de cálcio hidratados ligando as partículas argilosas corroídas.

Os dados químicos obtidos ao longo dos cortes transversais evidenciaram nas misturas com os solos que ocorre de fato uma transformação gradual do plasma original até surgirem as fases neoformadas (silicatos e aluminatos de cálcio hidratados). Outros constituintes, mais silicosos, também sofrem as transformações graduais, apresentando em consequência uma série de novos produtos.

Os produtos de hidratação do cimento, os silicatos, aluminatos e sulfoaluminatos de cálcio hidratados, ocorrem preferencialmente no interior das cavidades. Estes produtos na maior parte das vezes não são visíveis em microscopia óptica, como

revelaram as imagens de raios X.

Nas misturas estudadas as reações refletiram as condições de umidade, de homogeneização dos aditivos, a qualidade e a composição química da cal e os teores efetivamente aplicados.

Nas misturas onde foi empregada a cal dolomítica as reações ocorreram em pontos isolados e faixas muito estreitas nas bordas dos agregados de plasma (SCC/LR 2) e material da "matriz mista" (CC).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos mostram que de um modo geral as bases apresentam problemas relacionados à etapa de construção: o grau de compactação variável ao longo do segmento e da espessura da camada; a umidade acima ou muito abaixo do teor ótimo de compactação; a homogeneização deficiente da umidade e da mistura dos materiais com os aditivos, etc.

Nos pontos amostrados a morfologia dos materiais das bases refletiu esses problemas através de diferenciações de porosidade, concentração ou ausência de aditivos, organizações particulares do plasma e de outros constituintes.

As misturas solo-cal-cimento se caracterizam por apresentar agregados (ou zonas) de plasma não afetado, ou pouco afetado pelos aditivos, mais sensíveis às variações e esforços de origem hídrica e mecânica. Estão envolvidos por plasma transformado por reações com os aditivos em diversos graus, contendo os produtos de hidratação do cimento e de reação pozolânica da cal (silicatos, aluminatos e aluminossilicatos de cálcio hidratados), menos sensível às variações hídricas e mecânicas (sem fissuras) e mais resistente.

As misturas com cascalho de basalto alterado são constituídas por fragmentos líticos (cascalho de basalto), volumes de material do solo do subleito e uma "matriz mista". Foi principalmente a "matriz", gerada pela incorporação do solo e dos produtos do córtex de alteração do basalto, que se misturou e reagiu com os aditivos.

Cada uma dessas organizações é constituída por materiais química e mineralogicamente diversificados.

Nas misturas com cascalho, os fragmentos líticos "armam" o material enquanto os aditivos mantêm estável a "matriz". Nas misturas solo-cal-cimento, ao contrário, a "armação" é produzida pelo plasma do solo original transformado e enriquecido em produtos cimentantes (resultantes da hidratação e das reações pozolânicas), que isola volumes de material mais instável.

Dois aspectos importantes devem ser ressaltados:

- 1) a influência da qualidade e da composição química da cal aplicada - as neoformações minerais, transformações e reorganizações do material das misturas são mais evidentes naquelas onde foi empregada a cal cálcica do que naquelas com cal dolomítica (com ou sem cimento). Estas diferenças implicam em maior estabilidade das misturas tratadas com cal cálcica como comprovam também os dados de desempenho da pista;
- 2) as técnicas de construção das bases são as responsáveis pelas condições da mistura dos constituintes dos solos com os aditivos, da homogeneização da umidade (necessária para as reações de hidratação do cimento e pozolânicas) e grau de compactação. Ou seja, criam o ambiente físico e químico onde ocorrem as reações que promovem a estabilização. São também responsáveis, ao lado das reações químicas e físico-químicas desencadeadas pelos aditivos, pela morfologia do material.

Recomenda-se, portanto, um controle maior da qualidade dos aditivos aplicados, uma aprimoramento nas técnicas de homogeneização e mistura dos aditivos e da umidade, bem como da compactação. Isto pode implicar no emprego de equipamentos mais adequados.

ANEXO

TERMINOLOGIA MICROMORFOLÓGICA

ANEXO

TERMINOLOGIA MICROMORFOLÓGICA

A terminologia e os conceitos micromorfológicos adotados na pesquisa são aqueles apresentados por BREWER & SLEEMAN (1960) e BREWER (1976.)

Fundo matricial: é o material que compõe os "ped" (agregados) primários ou o material dos solos apedais. Constitui o fundo ou o "cenário" onde aparecem as feições pedológicas. Compreende o plasma, o esqueleto e os vazios.

Plasma: é a parte do material do solo que é capaz de ser, ou já foi, mobilizada, reorganizada e ou concentrada pelos processos de formação do solo. Inclui todo o material, orgânico ou mineral, de tamanho coloidal e relativamente solúvel não relacionado aos grãos do esqueleto.

Esqueleto: são os grãos individuais, relativamente estáveis e não são facilmente deslocados, concentrados ou reorganizados. Inclui os grãos minerais e corpos sílicos e orgânicos resistentes maiores do que o tamanho coloidal.

Separações plásmicas: são feições caracterizadas por uma mudança significativa no arranjo (*fabric*) dos constituintes, mais do que uma mudança de concentração de determinada fração do plasma.

Estrutura plásmica: é maneira como estão organizados os constituintes do plasma e os vazios (poros) muito pequenos que resultam do arranjo das partículas do plasma. É definido a partir de características ópticas resultante da orientação das partículas do plasma.

Plasma isótropo: o plasma é isótropo, isto é, indeterminado mesmo com grandes aumentos.

Plasma argilassépico: plasma predominantemente anisótropo, "manchado", onde se reconhecem domínios de argilo-minerais anisótropos, não orientados entre si.

Plasma silassépico: altas proporções de grãos do tamanho do silte.

Plasma insépico: o plasma apresenta separações plásmicas estriadas que ocorrem como zonas isoladas, ou ilhas.

Plasma massépico: o plasma apresenta separações plásmicas estriadas, não associadas a paredes de poros ou superfície de grãos do esqueleto. As zonas podem ser subparalelas ou desorientadas em relação umas às outras.

Plasma granossépico: as separações plásmicas com orientação estriada ocorrem subcutanicamente no contato com os grãos do esqueleto. A orientação estriada das separações plásmicas é predominantemente paralela à superfície dos grãos do esqueleto.

Plasma porossépico: as separações plásmicas com orientação estriada ocorrem subcutanicamente associadas com as paredes dos vazios (poros). A orientação estriada das separações plásmicas é predominantemente paralela às paredes dos vazios, especialmente nas fissuras.

Cristalária: cristais simples ou agrupados de frações relativamente puras, que não englobam a matriz do solo, mas formam massas coerentes. Sua morfologia (forma e estrutura interna) está de acordo com a sua formação atual nos vazios contidos no material estudado.

Poros de empilhamento composto: são poros resultantes do empilhamento aleatório dos grãos e dos "peds" (agregados) que não se acomodam uns em relação aos outros.

Cavidades: vazios relativamente grandes geralmente de forma irregular, normalmente não interconectados com outros vazios de tamanho comparável. Não são orientados e têm um padrão de distribuição aleatório.

Fissuras: são vazios planares. Podem ser subdivididos em vários grupos:

- a) poros aplainados de juntas - são vazios planares que atravessam o material do solo com um padrão regular. Ocorrem como sistemas;
- b) poros aplainados irregulares - vazios planares que cortam o material do solo de forma irregular. Não têm uma distribuição específica básica ou padrão de orientação entre os indivíduos;
- c) fendas - são vazios essencialmente planares com uma complexa conformação.

Padrão de distribuição relativa: classifica o tipo de distribuição (no fundo matricial) de elementos semelhantes em relação a indivíduos diferentes - a distribuição do plasma em relação ao esqueleto.

Distribuição relativa granular: sem plasma (grãos simples) ou o plasma ocorre como nódulos.

Distribuição relativa porfirogrânica: grãos isolados do esqueleto dentro de plasma quase contínuo.

BIBLIOGRAFIA

- ALEVA, G.J.J. - 1979 - Bauxitic and other duricrust on the Guiana Shield, South America. In: LATERITISATION PROCESSES, Trivandrum, *Proceedings...* New Delhi, Oxford & IBH Publ. Co, p. 261-269.
- ARANOVICH, L.A.S. & OGURTSOVA, J.B. - 1987 - Estabilização de solos lateríticos com e sem aditivos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 22ª, Maceió, 1987, *Anais...* Maceió, IPR-DER/AL, p. 709-733.
- ARNOLD, W. - 1985 - Essai de description geotechnique des caracteristiques qui determinent le comportement des sols residuels tropicaux em vue de leur classification. In: INT. CONF. ON GEOMECH. IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1st, Brasilia, 1985, *Proceedings...* Brasília, ABMS, vol. 1, p. 19-27.
- AUBERT, G. - 1965 - Classification des sols. Tableaux de classes, sous-classes, groupes et sous-groupes utilisés par la Section de Pédologie de l'ORSTOM. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie*, 3(3):269-288.
- AUBERT, G. & SEGALEN, P. - 1966 - Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie*, 4(4):97-112.
- AUTRET, P. - 1982 - Contribution a l'étude des graveleux lateritiques traités au ciment - Limite de Retrait. *Bull. liaison Labo P. et Ch.*, 118:7-16.
- AUTRET, P. - 1983 - *Latérites et gravaeux latéritiques*. Paris, ISTED, LCPC, 38p.
- AYLMORE, L.A.G. & QUIRK, J.P. - 1962 - The structural status of clay systems. In: NAT. CONF. ON CLAYS AND CLAY MINERALS, 9th, Lafayette, 1960, *Proceedings...*, New York, Pergamon Press, p. 104-130 (Clays and Clay Minerals, vol. 9).
- BALDOVIN, G. - 1969 - The shear strength of lateritic solis. In: INT. CONF. SOIL MECH. FOUND. ENG. 7th, Mexico, *Procedings...* 1:129-142.
- BANIN, A. & LAHAV, N. - 1968 - Particle size and optical properties of montmorillonite in suspension. *Israel J. Chemistry*, 6:235-250.
- BARATA, F.E. - 1981 - Algumas considerações críticas sobre "lateritas" e "materiais lateríticos" - Necessidade de terminologia brasileira adequada. In: SIMP. BRASIL. DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro, 1981, *Anais...* Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ-CNPq-ABMS., p. 308-323.
- BIZOUARD, H. - 1987 - Spectrometrie de rayons X: analyse par selection d'energie. In: ASSOCIATION NATIONALE DE LA RECHERCHE TECHNIQUE, *Microanalyse par sonde electronique: spectrometrie de rayons X*. Paris, AN RT, p. F/1 - F/19.
- BOGUE, R.H. - 1952 - *La química del cemento Portland*. Madrid. Ed. Dossat. 642p.

- BOILEAU, E.; TRESCASES, J.J. & GENSE, C. - 1992 - Action des ions Ca^{++} sur des minéraux des latérites (gibbsite, kaolinite, quartz) en milieu très alcalin. In: WACKERMAN, J-M. ed. *Organisation et fonctionnement des altérites et des sols*. Paris, ORSTOM, p.331-332.
- BOLT, G.H. - 1978 - Surface interaction between the soil solid phase and the soil solution. In: BOLT, G.H. & BRUGGENWERT, M.G.M. ed. *Soil Chemistry. A. Basic Elements*. 2 ed. Amsterdam, Elsevier, p.43-53.
- BRASIL (SERV. NAC. PESQ. AGRONÔMICA - COMISSÃO DE SOLOS) - 1960 - *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo*. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, CNEPA, 634p. (Bol. 12).
- BRASIL (SERV. NAC. PESQ. AGRONÔMICA - COMISSÃO DE SOLOS) - 1962 - *Levantamento de reconhecimento dos solos da região sob influência do reservatório de Furnas*. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, CNPA, 462p. (Bol. 13).
- BRESSON, L.M. - 1981 - Etude ultramicroscopique d'assemblages plasmiques sur lames ultraminces de sols réalisées par bombardement ionique. In: BIRDON, E.B.A. ed. *Submicroscopy of soils and weathered rocks*. Wageningen, Pudoc, p. 173-189.
- BREWER, R. - 1976 - *Fabric and mineral analysis of soils*. 2nd. Ed. New York, Robert E. Krieger Publ. Comp., 482p.
- BREWER, R. & SLEEMAN, J.R. - 1960 - Soil structure and fabric. Their definition and description. *Jour. Soil Sci.* 11:172-185.
- BRINDLEY, G.W. & SOUZA SANTOS, P. e H. - 1963 - Mineralogical studies of kaolinite-halloysite clays. I. Identification problems. *Amer. Min.* (48):897-910.
- BUCHANAN, F. - 1807 - *A journey from Malabar through the countries of Mysore, Canara and Malabar*. London, East India Company, vol. 2, p. 436-460.
- BUI, E.N.; MERMUT, A.R. & SANTOS, M.C.D. - 1989 - Microscopic and ultramicroscopic porosity of an Oxisol as determined by image analysis and water retention. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, (53):661-665.
- CAMBIER, Ph. - 1986 - *Organisation des constituants au sein de microagrégats de sols. - Application au système ferrallitique kaolinite - oxide de fer*. Paris, INRA, 226 p. (Thèse Doctorat - Inédita).
- CARNEIRO, F.B.L. & SILVA, H.C.M. - 1981 - Determinação do raio de curvatura da linha elástica de deformação com a utilização da Viga Benkelman dupla. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 16ª, Olinda, 1981, *Anais...* Recife, ABPv, DER/PE, vol.2, p. 686-702.

- CARVALHO, A.; CHAUVEL, A. & GONÇALVES, N.M.M. - 1983 - Alteration of basalt and formation of kaolinitic and gibbsitic material in the region of Ribeirão Preto (SP), Brasil. In: MELFI, A.J. & CARVALHO, A. ed. *Lateritisation Processes*. São Paulo, IAG-USP, p. 477-489.
- CARVALHO, A.; CHAUVEL, A.; GUIMARÃES, J.E.P.; MELFI, A.J.; NÓBREGA, M.T. - 1981 - Caracterização mineralógica, morfológica e geotécnica de alguns solos lateríticos desenvolvidos sobre basalto na Bacia do Paraná. In: SIMP. BRAS. DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro, 1981. *Anais...* Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ-CNPq-ABMS, p.340-381.
- CASTRO, E. - 1969 - *Estudos relativos a estabilização de solos com cal*. Rio de Janeiro, IPR, 76p. (Publ. 347).
- CASTRO, S.S. - 1980 - *O platô de Itapetininga e as formações superficiais, material de origem do Latossolo Vermelho Escuro - orto*. São Paulo, 156p. (Dissert. Mestrado, Depto. Geografia, FFLCH-USP).
- CHAGNAS, M. & TIJOU, J-C. - 1976 - Problèmes posés par la construction des chaussées au Gabon. *Bull. liaison Labo P. et Ch.*, (84):49-60.
- CHATTERJEE, A.K. - 1979 - Phase composition, microstructure quality and burning of portland cement clinkers, a review of phenomenological interrelations. London, *World Cement Technology*, 10(4):124-135; 10(5):165-173.
- CHAUSSIDON, J. - 1972a - Application of infrared spectroscopy to the study of mineral weathering. In: COLLOQ. INT. POTASH. INST. Bern, *Proceedings...* Bern, p.53-56.
- CHAUSSIDON, J. - 1972b - Application of infrared spectroscopy in the study of clay minerals. *Ceramurgia*, (3):210-213.
- CHAUVEL, A. - 1976 - *Recherches sur la transformation de sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saison contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges de Moyenne Casamance (Sénégal)*. Strasbourg, 495p. (Thèse Doct.)
- CHAUVEL, A.; GRIMALDI, M. & TESSIER, D. - 1991 - Changes in soil pore-space distribution following deforestation and revegetation: an exemple from the Central Amazon Basin, Brazil. *Forest Ecology and Management*, (38):259-271.
- CHAUVEL, A. & NÓBREGA, M.T. - 1980 - Comportamento dos solos argilosos desenvolvidos sobre basaltos do Brasil Meridional após tratamento com cal. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL, IV, São Paulo, 1979, *Anais...* São Paulo, ABPC, p.125-172 (Bol. ABPC nº 12).
- CHAUVEL, A.; NÓBREGA, M.T. & TESSIER, D. - 1983 - The effect of compaction and addition of lime on latosol. In: INTERNATIONAL WORKING MEETING ON SOIL

- MICROMORPHOLOGY, London, 1981, *Proc...* London, v. I, p.237-243.
- CHAUVEL, A.; PEDRO, G. & TESSIER, D. - 1976- Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaoliniques. *Science du Sol*, (2):101-113.
- CHOQUETTE, M.; BÉRUBÉ, M.A. & LOCAT, J. - 1987 - Mineralogical and microtextural changes associated with lime stabilization of marine clays from Eastern Canada. *Applied Clay Science*, (2):215-232.
- COLLINS, K. - 1985 - Towards characterization of tropical soil microstructure. In: INT. CONF. ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SASPROLITIC SOILS, 1st, Brasília, 1985, *Proceedings...* Brasília, ABMS, vol. 1, p. 85-96.
- COLLINS, K. & MCGOWN, A. - 1974 - The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. *Geotechnique*, (24):223-254.
- COLLINS, K. & MCGOWN, A. - 1983 - Micromorphological studies in soil engineering. In: BULLOCK, P. & MURPHY, C.P. ed. *Soil Micromorphology*. Rothamsted, ABA, vol.1, p. 195-218.
- COMIN-CHIARAMONTI, P. - 1988 - Petrological Notes. In: PICCIRILLO, E.M. & MELFI, A. J. ed. *The mesozoic flood volcanism of Parana basin: petrogenic and geophysical aspects*. São Paulo, USP, p.301-369.
- COMIN-CHIARAMONTI, P.; STOLFA, D.; GIARETTA, A.; MEZZACAS, G.; BALESTRA, R.; BELEZZA, P.; BORTOLUSSI, L.; BROTZU, P. & PAPATRECHAS, C. - 1988 - Bulk-rock compositions (Table A). In: PICCIRILLO, E.M. & MELFI, A. J. ed. *The mesozoic flood volcanism of Parana basin: petrogenic and geophysical aspects*. São Paulo, USP, p. 371-504.
- COPELAND, L.E. & KANTRO, D.L. - 1964 - Chemistry of hydration of Portland cement at ordinary temperature. In: TAYLOR, H.F.W. Ed. *The chemistry of cements*. London. AP Academic Press, vol.1, p.313-370.
- CORRÊA, F.C. - 1982 - Pavimentos com base de solo arenoso fino - características geotécnicas e aspectos do seu comportamento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 16^a, Olinda, 1981, *Anais...* ABPv, DER-PE, vol.1, p.117-139.
- CROFT, J.B. - 1967 - The influence of soil mineralogical composition on cement stabilisation. *Geotechnique*, (17):119-135.
- CRUZ, P. - 1969 - Engineering properties of some residual compacted soils. In: INT. CONF. SOIL MECH. FOUND. ENG., 7th, Mexico, *Proceedings...* 1:91-100.
- CURI, N.; LIMA, P.C. & LEPSCH, I.F. - 1978 - Terminologia e micromorfologia do solo. *Boletim Informativo da socied. bras. de Ciênc. do Solo*, 10(2):33-43.

- CZERNIN, W. - 1963 - *La química del cemento*. Gerona. Ed. Palestra, 167p.
- DIAMOND, S. & KINTER, E.B. - 1965 - Mechanisms of soil-lime stabilization. An interpretative review. *High Res. Board Rec.* (92):83-102.
- DIAS, R. D. & GEHLING, W.Y.Y. - 1985 - Influence of the macrostructure originated from pedologic process on the mechanical behavior of lateritic porous soils in south Brazil. In: INT. CONF. ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SASPROLITIC SOILS, 1st, Brasília, 1985, *Proceedings...* Brasília, ABMS, vol. 1, p. 255-268.
- DRON, R. - 1978 - L'activité pouzzolanique. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 93:66-69.
- EADES, J.L.; NICHOLS, F.PL; GRIM, R.E. - 1962 - Formation of new minerals with lime stabilization as proven by field experiments in Virginia. *HRB Bull.* (335):31-39.
- ESTÉOULE, J. & PERRET, P. - 1979 - Étude expérimentale des phénomènes de stabilisation des sols fins par la chaux. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, (99):99-109.
- EUA (SOIL SURVEY STAFF) - 1975 - *Soil taxonomy, a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Washington, USDA, 754p. (Agriculture Handbook 436).
- FABRÍCIO, J.M.; GONÇALVES, E.A. & FABRÍCIO, O.F. - 1988 - Metodologia não destrutiva para avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis através da interpretação das bacias de deformação. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 23^a, Florianópolis, 1988, *Anais...* Florianópolis, ABPv, p.1415-1445.
- FAO-UNESCO - 1971 - *Definition of soil units for the Soil Map of the World*. Rome, World Soil Resource Report, 72p.
- FARMER, V.C. - 1964 - Infra-red spectroscopy of silicates and related compounds. In: TAYLOR, H.F.W. Ed. *The chemistry of cements*. London, Academic Press. p. 289-309.
- FARMER, V.C. - 1968 - Infrared spectroscopy in clay mineral studies. *Clay Miner.* (7):373-387.
- FARMER, V.C. - 1974 - Vibrational spectroscopy in mineral chemistry. In: FARMER, V.C. ed. *The infrared spectra of mineral*. London, Mineralogical Society, p. 1-9 (Monograph 4).
- FARMER, V.C. - 1976 - The role of infrared spectroscopy in a Soil Research Institute. *Eur. Spectrosc. News*, (7):13-15.
- FARMER, V.C. - 1979 - The role of infrared spectroscopy in a Soil Research Institute: characterization of inorganic materials. *Eur. Spectrosc. News*, (25):25-27.

- FARMER, V.C.; JEEVERATNAM, J.; SPEAKMAN, K. & TAYLOR, H.F.W. - 1966 - Thermal decomposition of 14 Å tobermorite from Crestmore. In: SYMP. ON STRUCTURE OF PORTLAND CEMENT PASTE AND CONCRETE, *Proceedings...* Washington, HRB, p. 291-299 (Special Report 90).
- FARMER, V.C. & PALMIERI, F. - 1975 - The characterization of soil minerals by infrared spectroscopy. In: GIESEKING, E.J. ed. *Soil Components*. Berlin, Springer Verlag, Vol. 2, p.573-670.
- FARMER, V.C. & RUSSELL, J.D. - 1967 - Infrared absorption spectrometry in clay studies. *Clays Clay Miner.* (15):121-142.
- FAURE, A. - 1976 - Influence de la phase argileuse sur la susceptibilité au tassement des sols. *Science du Sol*, (2):121-130.
- FAURE, A. - 1978 - *Comportement des sols au compactage: rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement de grains*. Grenoble, 179p. (Thèse Univ. Scientifique et Médicale de Grenoble).
- FAURE, A. - 1980 - Comportamento mecânico das argilas em função da sua natureza: formulação de uma nova concepção de plasticidade e liquidez. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL, IV, São Paulo, 1979, *Anais...* São Paulo, ABPC, p. 100-123 (Bol. ABPC nº 12).
- FOSSBERG, P.E. & GREGG, J.S. - 1963 - *Soil stabilization in road construction in South Africa*. Pretoria, Nat. Inst. for Road Research, p.217-227 (separata - RR 55)
- FRANÇA (CPCS) - 1967 - *Classification de Sols*. Grignon, Lab. Géologie-Pédologie de L'E.N.S.A., 96p.
- FRIPIAT, J.J. - 1960 - Application de la spectroscopie infrarouge à l'étude des minéraux argileux. *Bull. Groupe Fr. Argiles*, 12(7):25-41.
- GIDIGASU, M.D. - 1976 - *Laterite soil engineering*. Amsterdam, Elsevier. 554p. (Developments in Geotechnical Engineering 9).
- GILLOT, J.E. - 1968 - *Clay in engineering geology*. Amsterdam, Elsevier, 296p.
- GLENN, G.R. - 1963 - *X-ray studies of lime-bentonite reactions products*. Ames. (PhD Thesis. Iowa State Univ. of Sci. and Technology).
- GOFFEAU, A. - 1978 - *Étude de la stabilisation à la chaux de sols argileux et limoneux*. Glemboux, 134p. (Thèse Fac. Sciences Agronomiques de l'Etat, Glemboux).
- GOLDBERG, I. & KLEIN, A. - 1952 - Some effects of treating expansive clays with calcium hydroxide. *ASTM, Spec. Publ.* (142):53-67.

- GONÇALVES, N.M.M. - 1987 - *Transformações mineralógicas e estruturais relacionadas à alteração hidrotermal e intempérica de rochas vulcânicas básicas da Bacia do Paraná Setentrional (Região de Ribeirão Preto - SP, Brasil)*. São Paulo, 212p. (Tese de Dout., IGUSP, Inédita).
- GREENLAND, D.J. & MOTT, C.J.B. - 1978 - Surfaces of soil particles. In: GREENLAND, D.J. & HAYES, M.H.B. ed. *The chemistry of soil constituents*. Chichester, John Wiley & Sons, p. 321-353.
- GRIMALDI, M. - 1981 - *Contribution a l'étude du tassement des sols: évolution de la structure d'un matériau limoneux soumis a des contraintes mecanique et hydriques*. Rennes, 221p. (Thes. ENSA, Rennes, Inédita).
- HENNING, O. - 1965 - Infrared investigation of the hydration of some cements. *Wiss. Z. Hochsch. Architekt. Bauw Weimar*, (12):395-399.
- HENNING, O. - 1966 - The hydration of alumina cement pastes. *Silikattechn.* (17):329.
- HENNING, O. - 1974 - Cements; the hydrated silicates and aluminates. In: FARMER, V.C. ed. *The infrared spectra of minerals*. London, Mineralogical Society, p.445-463 (Monograph 4).
- HENNING, O. & DANOWSKI, W. - 1966 - Infrared investigation of the double salts in the system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$. In: CONF., SILICATE IND. (SILICONF), 8th, Budapest, *Proceedings...* p. 321-234.
- HENNING, O.; DANOWSKI, W. & KÄSSNER, B. - 1967 - IR absorption spectra of aluminate hydrates at low temperatures. *Wiss. Z. Hochsch. Architekt. Bauw. Weimar*, (14):639-644.
- HENNING, O. & GERSTNER, B. - 1972 - On the infrared and x-ray analytical characterization of natural and synthetic calcium silicate hydrates. *Wiss. Z. Hochsch. Architekt. Bauw Weimar*, (19):53-58.
- HENNING, O. & WAGNER, H. - 1968 - Infrared investigation of calcium aluminate phosphate hydrates. *Wiss. Z. Hochsch. architekt Bauw Weimar*. (15):179-184.
- HÉRAUD, H.; RESTITUITO, J.; & TERLE, J. - 1975 - Traitement à la chaux e à la chaux-ciment des arènes granitiques d'Auvergne. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, (78):25-30.
- HONOLD, P. - 1985 - L'emploi adequat des sols tropicaux en construction routiere ivoirienne. In: INT. CONF. ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SASPROLITIC SOILS, 1st, Brasília, 1985, *Proceedings...* Brasília, ABMS, vol. 2, p.309-319.
- INGLES, O.G. & METCALF, J.B. - 1972 - *Soil stabilization. Principles and practice*. Sydney,

Butterworths, 374p.

- JAN, M.A. & WALKER, R.D. - 1963 - Effect of lime, moisture and compaction on a clay soil. *Highway Research Record*, 29:1-12.
- JIM, C.Y. - 1986 - Experimental study of soil microfabrics induced by anisotropic stresses of confined swelling and shrinking. *Geoderma*, 37(2):91-112.
- KÉZDI, A. - 1979 - *Stabilized earth roads*. Amsterdam, Elsevier, 327p. (Developments in Geotechnical Engineering, 19).
- KUPPER, A.A.G.; COSTA FILHO, L.M. & ANTUNES, F.S. - 1985 - Geotechnical characterization of the Sao Paulo red clay. In: INT. CONF. ON GEOMECH. IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1st, Brasília, 1985, *Proceedings...* Brasília, ABMS, vol. 1, p. 117-129.
- LAFEBER, D. - 1963 - On the spatial distribution of fabric elements in rock and soil fabrics. In: AUSTRALIAN NEW ZELAND CONF. SOIL MECH. FOUND. ENG., 4th, Adelaide, *Proceedings...* Adelaide, p. 185-199.
- LAFEBER, D. - 1965 - The graphical representation of planar pore patterns in soils. *Aust. J. Soil Res.*, (3):143-164.
- LAMB, D.W. - 1962 - Decomposed granite as fill material with particular reference to earthdam construction. In: SYMP. HONG KONG SOILS, *Proceedings...* p.57-71.
- LEA, F.M. - 1970 - *The chemistry of cement*. 3rd. Ed., Glasgow, Edward Arnold (Publisher), 727p.
- LE MOS, R.C. & SANTOS, R.D. - 1984 - *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 2^a Ed., Campinas, SBCS/SNLCS, 45p.
- LE ROUX, A. - 1969 - Traitements des sols argileux par la chaux. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.* (40):59-96.
- LIETARD, O. - 1977 - *Contribution à l'étude des propriétés physicochimiques, cristallographiques et morphologiques des kaolins*. Lorraine, 377p. (Thèse Inst. Nat. Polytechnique de Lorraine, Inédita).
- LOHNES, R.A.; FISH, R.O & DEMIREL, T. - 1971 - Geotechnical properties of selected Puerto Rican soils in relation to climate and parent rock. *Geol. Soc. Am. Bull.*, (82):2617-2624.
- LYON, R.J.P. - 1964 - Infrared analysis of soil minerals. In: RICH, I. & KUNZE, W. ed. *Soil clay mineralogy*. Chapel Hill, Univ. North Carolina Press, p.170-199.

- MAIGNIEN, R. - 1966 - *Review of research on laterites*. Paris, UNESCO, 148p.
- MELFI, A. J. - 1978 - Natureza e origem dos constituintes secundários dos solos desenvolvidos sobre as rochas básicas da Bacia do Paraná. *Cerâmica*, 24(105):347-354.
- MELFI, A. J. & PEDRO, G. - 1977 - Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil. Parte 1. Caracterização dos principais tipos de evolução pedogeoquímica. *Rev. Bras. Geoc.*, (7):271-286.
- MELFI, A.J. & PEDRO, G. - 1978 - Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil. Parte 2. Considerações sobre os mecanismos geoquímicos envolvidos no Brasil. *Rev. Bras. Geoc.*, (8):11-22.
- MESSOU, M. - 1981 - Desempenho de cascalho de laterita tratada com cimento na Costa do Marfim. In: SIMP. BRASIL. DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro, 1981, *Anais...* Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ-CNPq-ABMS, p. 415-441.
- MILLET, J.; FOURNIER, A. & SIERRA, R. - 1976 - Rôle des chaux industrielles dans leurs emplois avec les matériaux à caractères pouzzolanique. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, (83):91-98.
- MILLET, J. & HOMMEY, R. - 1974 - Etudes minéralogiques des pâtes pouzzolanes-chaux. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, (74):59-63.
- MITCHELL, J.K. - 1956 - The fabric of natural clays in relation to its engineering properties. *Highway Res. Board*, (35):693-713.
- MITCHELL, J.K. - 1976 - *Fundamentals of soil behaviour*. New York, Wiley and Sons.
- MITCHELL, J.K. & SITAR, N. - 1982 - Engineering properties of tropical residual soils. In: CONF. ENG. CONSTRUCTION IN TROPICAL AND RESIDUAL SOILS, *Proceedings...* ASCE, p. 30-57.
- MOLINS, R. - 1989 - Choix des conditions operatoires en microanalyse X. In: ASS. NAT. DE LA RECHERCHE TECHNIQUE. *Microanalyse par sonde electronique: aspects quantitatifs*. Paris, ANRT. p. D/1-D/16.
- MONTVENOUX, J.C. & GEOFFRAY, J.-M. - 1975 - Mise en évidence des propriétés pouzzolaniques des basaltes. *Bull. Liaison Labo P. et Ch.* (78):21-30.
- MOREIRA, R.P.N. - 1977 - Um método de avaliação de pavimentos flexíveis com base no raio de curvatura da linha elástica das deflexões. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 13ª, Curitiba, ABPv. *Separata*, 52p.
- MORLEVAT, J.P. - 1987 - Spectrometrie de Rayons X: analyse par dispersion de longueur

- d'onde. In: ASS. NAT. DE LA RECHERCHE TECHNIQUE. *Microanalyse par sonde electronique: spectrométrie de rayons X*. Paris, ANRT, p. B/1-B/17.
- MORTENSEN, J.L.D.; ANDERSON, D.M. & WHITE, J.L. - 1965 - Infrared spectrometry. In: BLACK et al. (ed). *Methods of soils analysis*. Am. Soc. Agron. Inc., 9:743-770
- MOTTA, L.M.G. da - 1981 - Observações sobre a pista experimental de Santa Catarina (areia, cal, cinza volante). In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 16ª, Olinda, *Anais...* Olinda, ABPv, DER-PE, vol. 2, p. 183-241.
- NEWILL, D. - 1961 - A laboratory investigation of two red clays from Kenya. *Geotechnique*, (11):303-318.
- NÓBREGA, M.T. - 1988 - *Contribuição ao estudo da estabilização de solos tropicais com adição de cal para fins rodoviários*. São Paulo. 189p. (Dissert. Mestrado, IGUSP, Inédita).
- NÓBREGA, M.T. & GUIMARÃES, J.E.P. - 1982 - Estabilização de Latossolo Vermelho Escuro argiloso com cal e Proposição do Manual Brasileiro de Construção de Solos Estabilizados com Cal. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 16, Olinda, 1981, *Anais...* Recife, DER-PE, vol. I, p.209-255.
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. - 1981 - Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: SIMP. BRASIL. DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro, 1981, *Anais...* Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ-CNPq-ABMS, p. 30-41.
- NOVAIS FERREIRA, H. - 1985 - Characterization, identification and classification of tropical lateritic and saprolitic soils for geotechnical purposes. In: INT. CONF. ON GEOMECH. IN TROPICAL LATERITIC AND A SAPROLITIC SOILS, 1st, Brasília, 1985, *Proceedings...* Brasília, ABMS, vol. 3, p. 139-170.
- ODA, M. - 1972 - Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular materials. *Soil Foundations*, (12):17-36.
- OGUNSANWO, O. - 1985 - The microfabric and permeability of a lateritic clay. In: INT. CONF. ON GEOMECH. IN TROPICAL LATERITIC AND A SAPROLITIC SOILS, 1st, Brasília, 1985, *Proceedings...* Brasília, ABMS, vol.1 p.397-402.
- OLIVEIRA, J.B. - 1977 - Latossolos da quadrícula de Campinas, SP-II. Características físicas. *R. Bras. Ciên. Solo*, (1):114-121.
- OLIVEIRA, J.B. ; JACOMINE, P.K.T. & CAMARGO, M.N. - 1992 - *Classes gerais de solos do Brasil*. Jaboticabal, FUNEP, 201p.
- OLIVEIRA, J.B. & MENCK, J.R.F. - 1977 - Latossolos da quadrícula de Campinas, SP.I. Características morfológicas e químicas. *Rev. Bras. Ciên. Solo*, (1):108-114.

- OLPHEN, van H. - 1963 - Compaction of clay sediments in the range of molecular particle distance. *Clays and Clay Minerals*, vol. 13, p.178-187.
- OLSON, R.E. & MITRONOVAS, F. - 1962 - Shear strength and consolidation characteristics of calcium and magnesium illite. *Clays and Clay Minerals*, vol. 9, p.185-209.
- PARANÁ-DER (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM-PR) - 1991 - *Especificações de serviços rodoviários*. Curitiba, DER-PR, 656p.
- PEDRO, G. - 1980 - Papel e influência das características mineralógicas sobre as modalidades de organização dos materiais argilosos nas condições de meio superficial. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL, IV, São Paulo, Anais... São Paulo, ABPC, p.15-59 (Bol. ABPC n. 12).
- PEDRO, G. - 1987 - Géochimie, minéralogie et organisation des sols. Aspects coordonnés des problèmes pédogenétiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédologie*, Vol. XXIII, (3):169-186.
- PEDRO, G.; CHAUVEL, A. & MELFI, J. - 1976 - Recherches sur la constitution et la genèse des Terra Roxa Estruturada du Brésil. *Ann. Agron.*, 27(3):265-294.
- PERRET, P. - 1977 - *Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fins par la chaux: étude globale du phénomène et applications*. Rennes, 166p. (Thèse INSA, Rennes).
- PERRET, P. - 1979 - Application pratique des nouvelles données expérimentales relatives à la stabilisation des sols fins par la chaux. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.* (99):110-118.
- PICCIRILLO, E.M.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MELFI, A.J.; STOLFA, D.; BELLINI, G.; MARQUES, L.S.; GIARETTA, A.; NARDY, A.J.R.; PINESE, J.P.P.; RAPOSO, M.I.B. & ROISENBERG, A. - 1988 - Petrochemistry of continental flood basalt-rhyolite suites and related intrusives from the Parana Basin (Brazil). In: PICCIRILLO, E.M. & MELFI, A.J. ed. *The mesozoic flood volcanism of Parana basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo, IAG-USP, p. 107-156.
- PITTA, M.R. & NASCIMENTO, A.P. - 1981 - Dosagem de solo melhorado com cimento por modificações físicas, químicas e mecânicas do solo original - DESOL P 02/80. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 16ª, Olinda, 1981, *Anais...* Olinda, ABPv, DER-PE, vol. 1, p. 283-352.
- PUIATTI, D.; PUIG, J. & SCHAEFFNER, M. - 1983 - Traitement des sols à la chaux aérienne et aux ciments. Méthodologie des études de laboratoire. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 124:123-142.
- POUCHOU, J.L. - 1987 - Pratique de la spectrometrie WDS. In: ASS. NAT. DE LA RECHERCHE TECHNIQUE. *Microanalyse par sonde electronique: spectrométrie de*

rayons X. Paris, ANRT, p. E/1-E/23.

POUCHOU, J.L. - 1989 - Modeles de corrections pour la microanalyse X quantitative. In: ASS. NAT. DE LA RECHERCHE TECHNIQUE. *Microanalyse par sonde electronique: aspects quantitatifs*. Paris, ANRT, p. C/1-C/36.

RAMACHANDRAN, V.S. - 1969 - *Applications of Differential Thermal Analysis in cement chemistry*. New York, Chemical Publ. Company, 308p.

REGOURD, M. & HORNAIN, H. - 1975 - Applications de la microscopie électronique à balayage. *Revue des Matériaux de Construction*, (693):73-87.

ROBINSON, G.W. - 1949 - *Soils, their origin, constitution and classification*. 3rd Ed., London, Thomas Murby & Co., 573p.

ROSENQVIST, I. T. - 1959 - Physico-chemical properties of soils. *Proc. Am. Soc. Civ. Engng.* 85, SM2, 31-53.

ROSENQVIST, I. T. - 1962 - The influence of physico-chemical factors upon the mechanical properties of clays. *Clays and Clay Minerals*, vol. 9, p. 12-27.

ROSSI, P.L.; ILDEFONSE, Ph.; NÓBREGA, M.T. & CHAUVEL, A. - 1983 - Étude des transformations structurales et mineralogiques provoquées par compactage avec ou sans addition de chaux a des argiles lateritiques bresiliennes. Paris. *Bull. de l'Assoc. Inter. de Géologie de l'Ingénieur*, (28):153-159.

ROSSI, P.L.; ILDEFONSE, P.; NÓBREGA, M.T. & CHAUVEL, A. - 1992 - Transformations mineralogiques et structurales d'argiles latéritiques brésiliennes provoquées par l'addition de chaux. In: WACKERMAN, J-M. Ed. *Organisation et fonctionnement des altérites et des sols*. Paris, ORSTOM, p.327-330.

RUFF, G. & HO, C. - 1966 - Time-temperature strength-reaction product relationships in lime-bentonite-water mixtures. *High. Res. Record*, (139):42-60.

RUSSELL, J.D. - 1974 - Instrumentation and techniques. In: FARMER, V.C. ed. *The infrared spectra of minerals*. London, Mineralogical Society, p. 11-25 (Monograph 4).

RYSKIN, Ya. I.; STAVITSKAYA, G.P. & MITROPOLSKI, N.A. - 1969 - Infrared and proton magnetic resonance spectra of xonotlite. *Neorg. Mater*, 5:577-581.

RYSKIN, Ya. I.; STAVITSKAYA, G.P.; ZHDANOV, S.P. & MITROPOLSKI, N.A. - 1969 - Spectroscopic study of the chemical structure of synthetic tobermorite. *Neorg. Mater*, 5:954-961.

SABRY, M.A.; LESTER, W.R.; PARCHER, J.V. - 1981 - Mineralogy of compacted clay-lime mixtures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45(1):144-150.

- SANTOS, M.C.D.; MERMUT, A.R. & RIBEIRO, M.R. - 1989 - Submicroscopy of clay microaggregates in an Oxisol from Pernambuco, Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1895-1901.
- SHERWOOD, P.T. - 1967 - Classification test on African red clays and Keuper marl. *Q. J. Eng. Geol.*, 1(1):47-55.
- SMART, P. & TOVEY, K. - 1982 - *Electron microscopy of soils and sediments: techniques*. Oxford, Clarendon Press. 264p.
- STOOPS, G. & JONGERIUS, A. - 1975 - Proposal for a micromorphological classification of the related distributions of fine and coarse particles. *Geoderma*, 13(5):189-199.
- TAYLOR, H.F.W. - 1964 - The calcium silicate hydrates. In: TAYLOR, H.F.W. Ed. *The chemistry of cements*. London, A.P. Acad. Press. vol. I, p.168-231.
- TAYLOR, H.F.W. - 1986 - Proposed structure for calcium silicate Hydrate gel. *J. Am. Ceram. Soc.*, 69(6):464-467.
- TESSIER, D. - 1980 - Papel e influência das condições físico-químicas do meio sobre o comportamento hídrico e a organização dos materiais argilosos. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL, IV, São Paulo, *Anais...* São Paulo, ABPC, p. 60-99 (Bol. ABPC n. 12).
- TESSIER, D. - 1984 - *Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration*. Paris, 361p. (Thèse Doct. Univ. Paris VII).
- TESSIER, D. - 1990 - Behaviour and microstructure of clay minerals. In: BOODT, M. de; HAYES, M. & HERBILLON, A. ed. *Soil colloids and their associations in aggregates*. New York, Plenum Press, p. 387-415.
- TESSIER, D. & PEDRO, G. - 1984 - Recherches sur le rôle des minéraux argileux dans l'organisation et comportement des sols. In: AFES, *Livre Jubilaire du Cinquantenaire*, p. 223-235.
- TERZAGHI, K. & PECK, R.B. - 1962 - *Mecânica dos solos na prática da engenharia*. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 659p.
- THOREZ, J. - 1976 - *Practical identification of clay minerals*. Dison, Editions G. Leclotte, 90p.
- TOWNSEND, F.C.; MANKE, G.P. & PARCER, J.V. - 1969 - Effect of remoulding on the properties of a lateritic soil. *High. Res. Board, Rec.* 284:76-84.
- TOWNSEND, F.C.; MANKE, G.P. & PARCER, J.V. - 1971 - The influence of sesquioxides on laterite soil properties. *High. Res. Board, Rec.* 374:80-92.

- TURRIZIANI, R. - 1964 - The calcium aluminate hydrates and related compounds. In: TAYLOR, F.F.W. Ed. *The chemistry of cements*. London, A.P. Acad. Press. vol.1, p.233-285.
- TURSINA, T.V.; YAMNOVA, I.A. & SHOBA, V.V. - 1980 - Combined stage-by-stage morphological, mineralogical and chemical study of composition and organization of saline soils. *Soviet Soil Sci.* p.81-94.
- VARGAS, M. - 1985 - The concept of tropical soils. In: INT. CONF. ON GEOMECH. IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1st, Brasília, 1985, *Proceedings...* Brasília, ABMS, vol. 3, p. 101-134.
- VAUGHAN, P. R. - 1985 - Mechanical and hydraulic properties of tropical lateritic and saprolitic soils, particularly as related to their structure and mineral components. In: INT. CONF. ON GEOMECH. IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1st, Brasília, 1985, *Proceedings...* Brasília, ABMS, vol.1, p. 231-263.
- VERBEKE, R. - 1969 - Sur un procédé de fabrication de lames minces dans roches peu cimentées et des sols. *Bull. de la Soc. Géol. France*, Tomo XI, 3:426-433.
- VERDEYEN, J.; ROISIN, V. & NUYENS, J. - 1971 - *Applications de la Mécanique des Sols*. Paris, Dunod Ed., vo. 1, 483p.
- VILLIBOR, D.F. - 1981 - *Pavimentos econômicos - Novas considerações*. São Carlos, 224p. (Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos - USP).
- WALLACE, K.B. - 1973 - Structural behaviour of residual soils of continually wet highlands of Papua, New Guinea. *Geotechnique*, 23(2):203-218.
- WANG, J.W.H. - 1966 - Role of magnesium oxide in soil-lime stabilization. *HRB Spec. Rept.*, (90):475.
- WARKENTIN, B.P. & YONG, R.N. - 1962 - Shear strength of montmorillonite and kaolinite related to interparticle forces. *Clays and Clay Minerals*, vol. 9, p.210-218.
- WHITE, J.L. - 1971 - Interpretation of infrared spectra of soil minerals. *Soil Sci.* 112-22-31.
- WHITE, J.L. - 1977 - Preparation of specimens for infrared analysis. In: DIXON, J.B. & WEED, B. ed. *Minerals in soil environments*. Madison, Soil Sci. Soc. Am.
- WHITE, J.L. & ROTH, C. - 1986 - Infrared spectrometry. In: KLUTE, A. ed. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Ed., Madison, American Society of Agronomy - Soil Science Society of America. p. 291-330 (Monograph n.9).
- YONG, R.N. & SHEERAN, D.E. - 1973 - Fabric unit interaction and soil behaviour. In: INT. SYMP. SOIL STRUCTURE, Gothenburg, *Proceedings...* p. 176-183.