

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DE MISTURAS DE SOLO,  
CAL E RESÍDUO “ÁGUA-DE-COLA”**

**Por:**

**MÁRIO MONTEIRO ROLIM**

**Engenheiro Civil**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Construções Rurais.

**Orientador:** Prof. Dr. Wesley Jorge Freire

Maio de 1999  
Campinas  
Estado de São Paulo  
Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

R646c Rolim, Mário Monteiro  
Caracterização físico-mecânica de misturas de solo, cal  
e resíduo “água-de-cola”. / Mário Monteiro Rolim.--  
Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Wesley Jorge Freire.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Resíduos industriais. 2. Materiais de construção. 3.  
Estadas vicinais. 4. Solos – Compactação. I. Freire,  
Wesley Jorge. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Aos meus amores  
Ana Cláudia,  
minha esposa, e  
Mário Augusto,  
meu filho, por  
todos os bons  
momentos

Aos meus pais  
e irmãos

As minhas irmãs  
Célia, Teresa e Cida, por todo o  
carinho que sempre me deram

A minha irmã Zélia  
cuja inteligência  
e dedicação  
sempre copieei

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Departamento de Tecnologia Rural da Universidade Federal Rural de Pernambuco, por mais esta oportunidade.

À Faculdade de Engenharia Agrícola e à UNICAMP, mais uma vez, pela minha aceitação como aluno de pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Wesley Jorge Freire, pela excelente orientação, ensinamentos, amizade, respeito, apoio, confiança, parceria e pela disponibilidade sempre demonstrada.

Aos Professores Doutores do DCR David, Rossi, Cortêz e Paulo, pelo ótimo relacionamento, especialmente ao Prof. Dr. Antonio L. Beraldo, pela amizade, incentivo e, à Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Irenilza A. Naas, pela amizade.

Às secretárias Vanessa, Deise, Aninha e Marta, pela atenção e os inúmeros momentos que compartilhamos.

Às laboratoristas Gisleiva e Liz, pela dedicação que sempre demonstraram e porque sem elas dificilmente conseguiria realizar tantos ensaios.

Ao desenhista Sr. Róbsom pelos desenhos e figuras e pela amizade.

Aos funcionários da Oficina Mecânica do DMA/FEAGRI, pelos equipamentos, em especial, ao Fubá, Luiz e José Maria

Aos Técnicos Meyer, Cipriano, Edson e Reinaldo, do Laboratório de Mecânica dos Solos da FEC, pelos ensaios preliminares realizados.

À Prof<sup>ª</sup>. Dra. Liedi Bernucci, pela confiança, sugestões, participação constante em todas as fases do trabalho.

Ao laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP, pelos ensaios e pela oportunidade de conhecer a tecnologia de solos tropicais; e em especial ao Técnico Edson, pela reconhecida dedicação, experiência e espírito de trabalho

Ao Prof. Dr. Job Nogami, pela atenção, dedicação, firmeza e ensinamentos, que encantam a todos que o conhecem.

À CAPES/PICDT, pela concessão da bolsa.

Ao Prof. Dr. Cássio Paiva, pelas sugestões e material fornecido.

À Prof<sup>ª</sup>. Dra. Eglé, pelas sugestões na banca de qualificação.

Ao Prof. Dr. Jorge Ceratti pelas sugestões no ensaio de durabilidade.

Aos meus colegas de pós, pela amizade e convivência durante estes anos, e, em especial, aos meus amigos Edmundo, Luis Ótávio, Maia, Daniela, Lúcia Rottava, Sandra, Vera da Silva, Jorge da Silva, Wilza, Gilvam Maciel, José do Egito e Pedro Marinho, pelos bons momentos.

Aos meus colegas da Politécnica, Hélder, Jair Camacho, Eduardo e Alex

À Rhodia do Brasil, na pessoa do eng. Walter Longhi, pelo fornecimento do solo e do resíduo “água-de-cola”.

À CPG/FEAGRI, pelos recursos fornecidos.

A todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

O meu muito obrigado.

## CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMO.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1 . INTRODUÇÃO .....	01
2 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	04
2 . 1 . Alguns estabilizadores de solo utilizados em pavimentação.....	04
2 . 1 . 1 . Cal.....	04
2 . 1 . 2 . Efeito do Látex no concreto.....	10
2 . 1 . 3 . Cinza volante e cal.....	13
2 . 2 . Resíduos utilizados como estabilizadores em pavimentação.....	15
2 . 2 . 1 . Licor negro Kraft.....	16
2 . 2 . 2 . Escória de aciaria.....	17
2 . 2 . 3 . Escória de fosfogesso.....	17
2 . 2 . 4 . Entulhos.....	19
2 . 2 . 5 . Cinza de combustão e de incineração.....	20
2 . 2 . 6 . Cinza volante.....	21
2 . 2 . 7 . Borra de carbureto.....	22
2 . 2 . 8 . Resíduos diversos.....	24
2 . 3 . Alguns ensaios aplicados à pavimentação.....	25
2 . 3 . 1 . Módulo de resiliência.....	27
2 . 3 . 2 . Modelos aplicados à resiliência de solos.....	32
2 . 3 . 3 . Correlação entre o módulo de resiliência e o CBR.....	35

3 .MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3 . 1 . Materiais.....	41
3 . 1 . 1 . Solo.....	41
3 . 1 . 2 . Cal.....	43
3 . 1 . 3 . Resíduo.....	44
3 . 1 . 4 . Equipamentos.....	44
3 . 2 . Métodos .....	44
3 . 2 . 1 . Ensaio de caracterização ambiental do resíduo e do solo incorporado com resíduo.....	44
3 . 2 . 2 . Aplicação dos tratamentos .....	47
3 . 2 . 3 . Ensaio de caracterização do solo e do solo-resíduo.....	48
3 . 2 . 4 . Classificação do solo segundo a metodologia MCT.....	49
3 . 2 . 5 . Determinação dos limites de consistência .....	52
3 . 2 . 6 . Ensaio de compactação.....	52
3 . 2 . 7 . Moldagem e cura de corpos-de-prova.....	55
3 . 2 . 8 . Índice de suporte Califórnia-CBR.....	55
3 . 2 . 9 . Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova de solo e solo-“água-de-cola”.....	63
3 . 2 . 10 . Ensaio de tração na compressão diametral.....	63
3 . 2 . 11 . Determinação do módulo de resiliência.....	64
3 . 2 . 12 . Ensaio de durabilidade por ciclos alternados de molhamento e secagem.....	70
3 . 2 . 13 . Análise estatística.....	72
4 . RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
4 . 1 . Ensaio de caracterização ambiental do resíduo.....	75
4 . 2 . Resultados preliminares.....	79
4 . 2 . 1 . Ensaio de compactação.....	79
4 . 2 . 2 . Ensaio de compressão simples.....	83
4 . 2 . 3 . Índice de suporte Califórnia.....	88
4 . 3 . Resultados definitivos.....	92
4 . 3 . 1 . Limites de consistência.....	92

4 . 3 . 2 .	Parâmetros de compactação normal de Proctor.....	94
4 . 3 . 3 .	Parâmetros de compactação mini-Proctor.....	97
4 . 3 . 4 .	Resistência à compressão simples.....	102
4 . 3 . 5 .	Resistência à tração na compressão diametral.....	110
4 . 3 . 6 .	Correlação entre a resistência à tração na compressão diametral e a resistência à compressão simples.....	118
4 . 3 . 7 .	Correlação entre o CBR-Adaptado e CBR-DNER.....	126
4 . 3 . 8 .	Índice de suporte CBR-Adaptado.....	128
4 . 3 . 9 .	Índice de suporte mini-CBR.....	135
4 . 3 . 10 .	Módulo de resiliência para o solo argiloso.....	139
4 . 3 . 11 .	Módulo de resiliência para o solo arenoso.....	148
4 . 3 . 12 .	Ensaio de durabilidade através de ciclos alternados de molhamento e secagem.....	158
5 .	CONCLUSÕES.....	176
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	180

## LISTA DE QUADROS

	página
QUADRO 1 - Resultados obtidos com corpos-de-prova (CORREA e FELEX, 1990).....	10
QUADRO 2 - Concreto modificado com polímero (SILVA <u>et al.</u> , 1996).....	11
QUADRO 3 - Tratamentos utilizados pelo DNER (1984).....	14
QUADRO 4 - Resultados dos ensaios realizados com amostras de solo-cal-cinza volante (DNER, 1984).....	14
QUADRO 5 - Tratamentos (misturas) com estabilizadores químicos aplicados ao solo (FOGAÇA e CERATTI, 1996).....	15
QUADRO 6 - Classificação dos solos finos de acordo com o seu CBR e a porcentagem de silte nos finos.....	37
QUADRO 7 - Características físicas dos solos estudados.....	42
QUADRO 8 - Definição dos tratamentos utilizados nos ensaios de laboratório.....	47
QUADRO 9 - Parâmetros característicos do CBR e CBR-Adaptado.....	61
QUADRO 10 - Configuração de tensões para o condicionamento de corpos-de-prova de solo arenoso.....	69
QUADRO 11 - Configuração de tensões para registro das deformações resilientes para o solo arenoso.....	69
QUADRO 12 - Configuração de tensões para registro das deformações resilientes para o solo argiloso.....	70
QUADRO 13 - Características principais do resíduo “água-de-cola”.....	76
QUADRO 14 - Comparação entre os metais do solubilizado com os valores da NBR – 10004.....	77
QUADRO 15 - Comparações entre os ácidos encontrados no solubilizado com os valores da NBR – 10004.....	78
QUADRO 16 - Características físicas do solo arenoso-1.....	79
QUADRO 17 - Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo argiloso sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações.....	80

QUADRO 18 -	Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações.....	80
QUADRO 19 -	Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo arenoso-1 sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações.....	80
QUADRO 20 -	Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo arenoso-1 sob tratamento com 3% de cal e “água-de-cola” com diferentes concentrações.....	81
QUADRO 21 -	Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo arenoso-1 sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações.....	81
QUADRO 22 -	Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo arenoso-1 e do solo tratado com 3% de cal, ambos sob tratamento com 8% de “água-de-cola” com diferentes concentrações.....	83
QUADRO 23 -	Resistência à compressão simples, de corpos-de-prova de solo arenoso-1 e de solo arenoso-1 adicionado de cal sob tratamento de “água-de-cola” com diferentes concentrações.....	87
QUADRO 24 -	Índice de suporte Califórnia (CBR) do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações, sem imersão.....	89
QUADRO 25 -	Índice de suporte Califórnia (CBR) do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações, sem imersão.....	89
QUADRO 26 -	Índice de suporte Califórnia (CBR) do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações, com imersão.....	90
QUADRO 27 -	Índice de suporte Califórnia (CBR) do solo arenoso-1 e do solo arenoso-1 adicionado de cal sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações, sem imersão.....	90
QUADRO 28 -	Limites de consistência do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal tratados com “água-de-cola” com diferentes concentrações de PVA...	92
QUADRO 29 -	Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações.....	95
QUADRO 30 -	Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo arenoso e do solo arenoso adicionado de cal sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações	95
QUADRO 31 -	Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso com adição de 3% de cal, sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações de PVA (em MPa).....	103

QUADRO 32 - Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo arenoso e solo arenoso com adição de 3% de cal, sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações de PVA (em MPa).....	104
QUADRO 33 - Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionados de cal, sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações de PVA (em kPa).....	110
QUADRO 34 - Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adição de 3% de cal sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações de PVA (em kPa).....	111
QUADRO 35 - Índice de CBR-Adaptado do solo argiloso e solo argiloso adicionados de cal, sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações de PVA (%)......	128
QUADRO 36 - Índice de CBR-Adaptado do solo arenoso e solo arenoso adicionados de cal, sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações de PVA (%)......	129
QUADRO 37 - Comparação entre o índice mini-CBR com imersão e sem imersão para o solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal.....	136
QUADRO 38 - Comparação entre o índice mini-CBR com imersão e sem imersão para o solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal.....	136
QUADRO 39 - Resumo dos principais parâmetros do módulo de resiliência do solo argiloso.....	143
QUADRO 40 - Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso.....	151
QUADRO 41 - Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso tratado com 8% de “água-de-cola” a 5% de concentração.....	152
QUADRO 42 - Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso tratado com 8% de “água-de-cola” a 10% de concentração.....	153
QUADRO 43 - Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso tratado com 3% de cal.....	154
QUADRO 44 - Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso adicionado de cal e tratado com 8% de “água-de-cola” a 5% de concentração.....	155
QUADRO 45 - Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso adicionado de cal e tratado com 8% de “água-de-cola” a 10% de concentração.....	156

## LISTA DE FIGURAS

	página
FIGURA 1 - Projeto de um aterro de estrada (MANK <u>et al.</u> , 1991).....	23
FIGURA 2 - Esquema da seção piloto do pavimento utilizado por MULDER (1991).....	25
FIGURA 3 - Gráfico para classificação MCT pelo método das pastilhas (GODOY et al., 1998).....	26
FIGURA 4 - Gráfico da classificação MCT pastilhas.....	27
FIGURA 5 - Deformações permanente e resiliente (MEDINA, 1997).....	29
FIGURA 6 - Esquema do equipamento triaxial utilizado por MEDINA (1997).....	30
FIGURA 7 - Modelos de módulo de resiliência (MEDINA <u>et al.</u> , 1986).....	34
FIGURA 8 - Relação entre o módulo de resiliência e CBR (VISSER <u>et al.</u> , 1983).....	36
FIGURA 9 - Classificação MCT para solos finos e relação do módulo resiliente com o CBR (DNER, 1996).....	38
FIGURA 10 - Relação entre umidade de equilíbrio e umidade de campo para sub-leito, base e sub-base (MEDINA, 1997).....	40
FIGURA 11 - Curva granulométrica do solo argiloso e arenoso.....	42
FIGURA 12 Fluxograma para classificação de resíduos (CETESB, 1985).....	46
FIGURA 13 - Detalhe da compactação mini-Proctor.....	53
FIGURA 14 - Dispositivo de medição da altura do corpo-de-prova.....	54
FIGURA 15 - Dispositivo de extração do corpo-de-prova.....	54
FIGURA 16 - Prensa de penetração do mini-CBR.....	57
FIGURA 17 - Configuração do número de golpes.....	58
FIGURA 18 - Detalhe do molde CBR-Adaptado (medidas em cm).....	59
FIGURA 19 - Detalhe do pistão-Adaptado (medidas em mm).....	60
FIGURA 20 - Molde CBR-Adaptado com colar.....	62
FIGURA 21 - CBR-Adaptado em operação.....	62
FIGURA 22 - Corpos-de-prova no ensaio de tração por compressão diametral.....	64
FIGURA 23 - Equipamento de compactação utilizado na confecção de corpos-de-prova para o módulo de resiliência.....	65

FIGURA 24 -	Corpos-de-prova na base da célula triaxial.....	67
FIGURA 25 -	Corpo-de-prova na célula triaxial.....	67
FIGURA 26 -	Equipamento triaxial com caixa de controle das tensões, célula de carga, sistema de aquisição de dados e micro-computador.....	68
FIGURA 27 -	Modelo do módulo de resiliência em função da tensão desvio para o solo argiloso.....	71
FIGURA 28 -	Modelo do módulo de resiliência em função da tensão confinante para o solo arenoso.....	71
FIGURA 29 -	Detalhe do corpo-de-prova no processo de molhamento (a) e secagem (b)	73
FIGURA 30 -	Extensômetro utilizado nas medições de expansão e contração.....	74
FIGURA 31 -	Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo arenoso-1 tratado com 8% de “água-de-cola” com diferentes concentrações de PVA (médias de 2 repetições).....	84
FIGURA 32 -	Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo arenoso-1 e solo arenoso-1 adicionado com 3% de cal, e tratados com 8% de “água-de-cola” em diferentes concentrações de PVA (médias de 2 repetições).....	84
FIGURA 33 -	Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo arenoso-1 e solo arenoso-1 adicionado de 3 e 5% de cal e 8% de “água-de-cola” em diferentes concentrações de PVA (médias de 2 repetições).....	85
FIGURA 34 -	Resistência à compressão simples aos 7 dias de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de 3% cal, e tratados com 3% de cal e 15% de “água-de-cola” em diferentes concentrações de PVA (médias de 2 repetições).....	85
FIGURA 35 -	Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do solo argiloso sem adição de cal.....	99
FIGURA 36 -	Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do solo argiloso adicionado de cal.....	99
FIGURA 37 -	Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do solo arenoso sem adição de cal.....	100
FIGURA 38 -	Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do solo arenoso adicionado de cal.....	100
FIGURA 39 -	Comparação entre os pesos específicos aparentes secos máximos obtidos do ensaio de compactação normal de Proctor e do ensaio mini-Proctor.....	101
FIGURA 40 -	Comparação entre as umidades ótimas obtidas do ensaio de compactação normal de Proctor e do ensaio mini-Proctor.....	101
FIGURA 41 -	Resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solos e de solo-cal tratados com diferentes doses de “água-de-cola” em diversas concentrações, rompidos aos 14 dias de idade.....	105
FIGURA 42 -	Resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solos	

e de solo-cal tratados com diferentes doses de “água-de-cola” em diversas concentrações, rompidos aos 21 dias de idade.....	105
FIGURA 43 - Resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solos e de solo-cal tratados com diferentes doses de “água-de-cola” em diversas concentrações, rompidos aos 90 dias de idade.....	106
FIGURA 44 - Resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solos e de solo-cal tratados com doses de “água-de-cola” nas diversas concentrações, rompidos aos 180 dias de idade.....	106
FIGURA 45 - Evolução da resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo argiloso e de solo argiloso adicionados de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações.....	107
FIGURA 46 - Evolução da resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo arenoso e de solo arenoso adicionados de cal, tratados com 8% de “água-de-cola” em diversas concentrações.....	105
FIGURA 47 - Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo e de solo adicionado de cal, tratados com “água-de-cola” em diversas concentrações, e rompidos aos 14 dias de idade.....	112
FIGURA 48 - Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo e de solo adicionado de cal, tratados com “água-de-cola” em diversas concentrações, e rompidos aos 21 dias de idade.....	112
FIGURA 49 - Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo e de solo adicionado de cal, tratados com “água-de-cola” em diversas concentrações, e rompidos aos 90 dias de idade.....	113
FIGURA 50 - Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo e de solo adicionado de cal, tratados com “água-de-cola” em diversas concentrações, e rompidos aos 180 dias de idade.....	113
FIGURA 51 - Evolução da resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo argiloso e de solo argiloso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações.....	114
FIGURA 52 - Evolução da resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo arenoso e de solo arenoso adicionado de cal, tratados com 8% de “água-de-cola” em diversas concentrações.....	114
FIGURA 53 - Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova de solo argiloso.....	119
FIGURA 54 - Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova de solo arenoso.....	120
FIGURA 55 - Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal rompidos aos 14 e 21 dias de idade.....	120
FIGURA 56 - Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal rompidos aos 90 dias de idade.....	121
FIGURA 57 - Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal rompidos aos 180 dias de idade.....	121
FIGURA 58 - Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de	

corpos-de-prova de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 5%, rompidos aos 14 e 21 dias de idade.....	122
FIGURA 59 - Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada 5%, rompidos aos 90 dias de idade.....	122
FIGURA 60 - Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 5%, rompidos aos 180 dias de idade.....	123
FIGURA 61 - Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 10%, e rompidos aos 14 e 21 dias de idade.....	123
FIGURA 62 - Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 10%, rompidos aos 90 dias de idade.....	124
FIGURA 63 - Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 10%, rompidos aos 180 dias de idade.....	124
FIGURA 64 - Correlação entre o CBR-Adaptado e o CBR-DNER.....	127
FIGURA 65 - Valores de CBR-Adaptado dos solos e dos solos adicionados de cal tratados com doses de 8 e 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações, aos 21 dias de cura.....	129
FIGURA 66 - Valores de CBR-Adaptado dos solos e dos solos adicionados de cal tratados com doses de 8 e 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações, aos 60 dias de cura.....	130
FIGURA 65 - Valores de CBR-Adaptado dos solos e dos solos adicionados de cal tratados com doses de 8 e 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações, aos 120 dias de cura.....	130
FIGURA 68 - Variação dos valores de CBR-Adaptado do solo argiloso e solo argiloso adicionados de cal, tratados com a dose de 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações, aos 21, 60 e 120 dias de cura.....	131
FIGURA 69 - Variação dos valores de CBR-Adaptado do solo arenoso e solo arenoso adicionados de cal, tratados com a dose de 8% de “água-de-cola” em diversas concentrações, aos 21, 60 e 120 dias de cura.....	131
FIGURA 70 - Comparação entre os valores de mini-CBR com imersão e sem imersão do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações.....	137
FIGURA 71 - Comparação entre os valores de mini-CBR com imersão e sem imersão do solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações.....	137
FIGURA 72 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso.....	140
FIGURA 73 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso tratado com 15% de “água-de-cola” a 5% de concentração.....	140

FIGURA 74 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso tratado com 15% de “água-de-cola” a 10% de concentração.....	141
FIGURA 75 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso adicionado de cal.....	141
FIGURA 76 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso adicionado de cal e tratado com 15% de “água-de-cola” a 5% de concentração.....	142
FIGURA 77 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso adicionado de cal e tratado com 15% de “água-de-cola” a 10% de concentração.....	142
FIGURA 78 - Correlação entre o CBR-Adaptado e o módulo de resiliência, para o solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações.....	147
FIGURA 79 - Correlação entre o mini-CBR e o módulo de resiliência, para o solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações.....	148
FIGURA 80 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso.....	151
FIGURA 81 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso tratado com 8% de “água-de-cola” a 5% de concentração.....	152
FIGURA 82 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso tratado com 8% de “água-de-cola” a 10% de concentração....	153
FIGURA 83 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso tratado com 3% de cal.....	154
FIGURA 84 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso adicionado de cal e tratado com 8% de “água-de-cola” a 5% de concentração.....	155
FIGURA 85 - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso adicionado de cal e tratado com 8% de “água-de-cola” a 10% de concentração.....	156
FIGURA 86 - Teores de umidade de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com “água-de-cola”, determinados na moldagem (a), após 21 dias de câmara úmida (b), e antes e após os ciclos de molhamento e secagem (c).....	159
FIGURA 87 - Teores de umidade de corpos-de-prova de solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal, tratado com “água-de-cola”, determinados por ocasião da moldagem (a), após 21 dias de câmara úmida (b), e antes e após os ciclos de molhamento e secagem (c).....	159
FIGURA 88 - Teores de umidade do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com “água-de-cola”, durante os ciclos de molhamento e secagem	160
FIGURA 89 - Teores de umidade do solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o primeiro ciclo de molhamento e secagem.....	160

FIGURA 90	Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com “água-de-cola”, antes e após os ciclos alternados de molhamento e secagem.....	162
FIGURA 91	Resistência à tração de corpos-de-prova de solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal, tratados com “água-de-cola”, antes e após os ciclos alternados de molhamento e secagem.....	162
FIGURA 92 -	Expansão axial do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com "água-de-cola", no primeiro ciclo de molhamento e secagem.....	164
FIGURA 93 -	Expansão axial do solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal e tratado com "água-de-cola", no primeiro ciclo de molhamento e secagem..	164
FIGURA 94 -	Contração axial do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, no primeiro ciclo de molhamento e secagem..	165
FIGURA 95 -	Contração axial do solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, no primeiro ciclo de molhamento e secagem..	165
FIGURA 96 -	Expansão axial do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, no segundo ciclo de molhamento e secagem.....	166
FIGURA 97 -	Expansão axial do solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, no segundo ciclo de molhamento e secagem..	166
FIGURA 98 -	Contração axial do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, no segundo ciclo de molhamento e secagem..	167
FIGURA 99 -	Contração axial do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, no segundo ciclo de molhamento e secagem..	167
FIGURA 100	Expansão axial do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal tratado com "água-de-cola", no terceiro ciclo de molhamento e secagem.....	168
FIGURA 101	Expansão axial do solo arenoso adicionado de cal tratado com "água-de-cola", no terceiro ciclo de molhamento e secagem.....	168
FIGURA 102	Contração axial do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal tratado com "água-de-cola", no terceiro ciclo de molhamento e secagem.....	169
FIGURA 103	Contração axial do solo arenoso adicionado de cal tratado com "água-de-cola", no terceiro ciclo de molhamento e secagem.....	169
FIGURA 104	Expansão axial do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal tratado com "água-de-cola", no quarto ciclo de molhamento e secagem.....	170
FIGURA 105	Expansão axial do solo arenoso adicionado de cal tratado com "água-de-cola", no quarto ciclo de molhamento e secagem.....	170
FIGURA 106	Contração axial do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal tratado com "água-de-cola", no quinto ciclo de molhamento e secagem.....	171
FIGURA 107	Contração axial do solo arenoso adicionado de cal tratado com "água-de-cola", no quinto ciclo de molhamento e secagem.....	171

## RESUMO

Resultante da fabricação da “cola-branca” (PVA), o resíduo “água-de-cola” é um efluente líquido classificado, de acordo com as normas brasileiras, como resíduo Classe III - Inerte, podendo ser depositado em aterro comum, sem qualquer dano ambiental. Dois tipos de solo, a saber: um argiloso e outro arenoso, foram tratados com 8% e 15% de “água-de-cola” concentrada a 5 e 10%, e reforçados com 3% de cal.

Os solos estudados tiveram suas composições granulométricas e seus respectivos pesos específicos determinados em laboratório, sendo ambos classificados posteriormente segundo a metodologia MCT.

Em seguida foram determinados seus limites de consistência e seus parâmetros de compactação através dos ensaios de compactação normal de Proctor e de mini-Proctor.

Após a definição e aplicação dos diversos tratamentos, com as misturas de solo, cal e resíduo “água-de-cola” foram moldados corpos-de-prova que, depois de adequadamente curados, foram submetidos a ensaios de CBR tradicional, CBR-Adaptado e mini-CBR, além de ensaios de compressão simples, tração na compressão diametral, e de durabilidade por ciclos alternados de molhamento e secagem.

Foram determinados, também, os valores dos módulos de resiliência dos solos estudados, assim como os coeficientes de correlação matemática entre eles e os índices de suporte.

Os dados obtidos foram estatisticamente analisados e interpretados e os resultados mostraram que o tratamento do solo unicamente com “água-de-cola” afetou negativamente, em relação ao tempo de cura, a resistência à compressão simples, a resistência à tração na compressão diametral e a capacidade de suporte do solo. O solo argiloso apresentou sempre valores elevados de módulo de resiliência, em relação ao solo arenoso, embora apresentasse, também, maiores valores de expansão e de contração axiais. A adição de 3% de cal aos solos resultou, por sua vez, em acréscimos da resistência à compressão simples e do índice CBR-Adaptado, com o aumento do tempo de cura. A resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de solo argiloso foi sempre superior à do solo arenoso, quer fossem eles tratados ou não com “água-de-cola” e cal.

## SUMMARY

The “água-de-cola” is a liquid effluent resulting from industrial PVA production classified as Class III – Inactive residue according to Brazilian regulations. So, this residue can be disposed on landfills without any environmental damage.

Two types of soil, a clayey soil and a sandy one, were treated with 8% and 15% dosage of a 5% and 10% concentrated “água-de-cola”, and reinforced with 3% lime. Both soils were tested in laboratory conditions in order to determine its grain size and physical test constants, and the optimum moisture content and maximum density. Soils were also classified according to MCT methodology.

Treatments were then applied to soils and specimens were molded with the soil, lime and “água-de-cola” mixtures.

After adequate curing the specimens were submitted to normal California Bearing Ratio (CBR), Adapted-CBR and Mini-CBR tests. Besides the load-carrying capacity of soil mixtures were also determined its compressive strength, splitting tensile strength, and wetting and drying loss of resistance after four wet-dry cycles.

The resilient modulus was determined for both soils as well as its mathematical correlation with the corresponding bearing ratio.

The data were statistically analyzed and the results showed that the treatment of soil only with “água-de-cola” negatively affected its compressive strength, splitting tensile strength and load-carrying capacity in comparison to the

control. The clayey soil presented higher values of resilient modulus and predominant axial swelling and shrinkage characteristics in comparison to the sandy soil. The addition of 3% lime to soil decreased its compressive strength and its load-carrying capacity in relation to the curing period. The splitting tensile strength of clayey soil specimen was always higher than the sandy soil one, either treated or not with “água-de-cola” and lime.

## 1 . INTRODUÇÃO

Resultante do processamento da “cola-branca” (PVA - Poli-Acetato de Vinila), o resíduo “água-de-cola”, efluente líquido, é obtido da lavagem de reatores, cubas e guardas hidráulicas, e produzido à razão de 700 litros para cada 1000 kg de PVA. Sua disposição é feita encaminhando-se o resíduo a uma fossa coletora de efluente, de onde, finalmente, é lançado diretamente sobre o leito carroçável de estradas de terra, com a finalidade de reduzir a formação de pó.

Geralmente os resíduos têm, como destinação final, na maioria dos casos, os tradicionais sistemas de tratamento associados a lagoas de estabilização. A maior parte destas soluções busca unicamente o tratamento em si, muito embora, se reconheça que, em muitos casos, elementos químicos de grande valor industrial estejam sendo desperdiçados, alguns deles com elevado potencial como agente estabilizador de solos.

A reutilização é uma alternativa desejável na maioria dos casos, como, por exemplo, o da indústria sucro-alcooleira, que vem buscando soluções adequadas para o aproveitamento dos seus resíduos, sendo alguns deles transformados em energia, ração animal, adubo para a própria lavoura de cana de açúcar, e tantas outras. A indústria cimenteira, por sua vez, é uma das grandes receptoras de resíduos, tais como a escória de alto-forno, a cinza volante e a cinza de casca-de-arroz.

A busca por novos materiais de baixo custo e, em especial, a utilização de resíduos industriais e agro-industriais, vem sendo amplamente estudada e

discutida nos diversos eventos técnico-científicos da área de material de construção e de pavimentação. A transformação de resíduos em sub-produtos é a meta de todas as indústrias preocupadas com a questão ambiental e a minoração dos custos do tratamento, algumas delas tendo já alcançando grande sucesso.

A pavimentação, por sua vez, pela sua extensão e grandes volumes de solo mobilizados, constitui-se uma alternativa ao reuso de resíduos, principalmente aqueles com certo potencial de estabilização.

Os resíduos industriais ou sub-produtos, quando disponíveis próximo das áreas em que são produzidos, resultam, geralmente, em soluções de baixo custo. A estabilização de solos com resíduos industriais ou agroindustriais tem permitido aplicações proveitosas, tais como na fabricação de tijolos, blocos, placas e painéis construtivos; na construção de paredes monolíticas; na execução de bases de estradas; na redução da formação de pó em estradas, etc. Exemplos desses resíduos são as cinzas pesada e volante, a cinza de casca-de-arroz, a lignina alcalina, o licor negro Kraft, a vinhaça concentrada, o cloreto de cálcio, o hidróxido de sódio, a escória de alto-forno, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar, o fosfogesso, entre outros. Alguns destes resíduos já têm seu uso consagrado quando associados à cal ou ao cimento, ou até mesmo em substituição parcial destes elementos, no Brasil e, principalmente, no exterior.

Na maioria dos casos, a presença de baixos teores de sólidos totais nos resíduos líquidos faz com que seja necessária uma prévia concentração dos mesmos, antes de serem utilizados em mistura com solos. Por outro lado, resíduos sólidos, utilizados como aglomerantes pozolânicos, necessitam de moagem fina a fim de se conseguir maior grau de finura, a exemplo da escória de alto-forno, da cinza volante ou da cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

A avaliação do grau de estabilização de misturas de solo e de solos adicionados de aditivos, é feita por meio de ensaios físico-mecânicos, tais como,

ensaios de compressão simples, de tração na compressão diametral, de capacidade de suporte, de módulo de resiliência, de durabilidade, e outros. Misturas de solos incorporados com resíduos necessitam ainda de ensaios ambientais, como os de lixiviação e de solubilização, que permitam classificá-las e principalmente determinar o comportamento de suas propriedades ao longo do tempo.

Este trabalho tem como objetivo estudar a caracterização físico-mecânica de misturas de solo, cal e resíduo “água de cola”, visando a obtenção de um material alternativo passível de ser utilizado em pavimentação de estradas de baixo volume de tráfego, assim como em outras obras de terra cujas características sejam próprias para sua aceitação.

Para tal, o material solo-resíduo será submetido aos ensaios de: caracterização físico-mecânica, dos limites de consistência, compactação, compressão simples, tração na compressão diametral, capacidade de suporte, determinação do módulo de resiliência e durabilidade por ciclos de molhamento e secagem.

## **2 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

De acordo com SILVEIRA (1967), a estabilização do solo, em seu sentido mais restrito, consiste no tratamento artificial do mesmo pela adição de um material denominado estabilizador, visando melhorar suas características físicas e mecânicas para uso em obras de engenharia.

Vários produtos químicos vêm sendo empregados como agentes estabilizadores do solo para fins de pavimentação, tais como o cimento Portland, a cal, o cloreto de cálcio, a cal-cinza volante, a escória granulada de alto-forno, o DS-328, o CONAID, etc.

### **2 . 1 . Alguns estabilizadores de solo utilizados em pavimentação**

#### **2 . 1 . 1 . Cal, cimento e outros aditivos químicos**

THOMPSON (1967) afirmou que solos reativos à cal são aqueles que com ela reagem para produzir ganhos de resistência à compressão simples superiores a 345 kPa; valores inferiores a este indicam que os solos não são reativos. Por outro lado, para os solos vermelhos tropicais, THOMPSON (1967) propôs que a atividade da cal seja tomada como sendo a diferença numérica da resistência à compressão simples do solo-cal estabilizado em relação ao solo natural.

Herrin e Mitchell, citados por SVENSON (1981), verificaram que, tão logo seja a cal adicionada ao solo, ocorre floculação e, ao longo do tempo, troca catiônica. As reações que se processam lentamente são as que desenvolvem a

ação cimentante da cal, sendo a reação pozolânica a principal responsável pela cimentação. Os autores afirmaram que a temperatura afeta essa reação, provocando retardamento entre 13 e 16 °C, aceleração a temperaturas superiores a essa faixa, e interrupção ao reagir a cal com o dióxido de carbono do ar, carbonatando-se, isto é, produzindo carbonato de cálcio.

Os efeitos da aplicação de 2%, 4%, 7% e 10% de cal pozolânica sobre a estabilização de solos vermelhos tropicais, avaliados através dos parâmetros de compactação, da resistência à compressão simples aos 7, 28 e 60 dias, e da área específica determinada pelo método do permeâmetro de Braine, foram estudados por AMORIM *et al.* (1996). A partir dos resultados obtidos, os autores tiraram as seguintes conclusões:

- a cal pozolânica provocou uma diminuição da massa específica aparente seca máxima e um aumento na umidade ótima dos solos estudados;
- a reatividade dos solos vermelhos é manifestada muito lentamente e depende de fatores como o teor de cal e o tempo de cura;
- o uso da superfície específica como índice de atividade pozolânica dos solos estabilizados com cal pozolânica não se mostrou satisfatório;
- não houve correlação entre a área específica e a resistência à compressão simples dos solos estudados;
- não foi possível obter uma correlação entre a área específica e o índice de reatividade de Thompson, para solos vermelhos tropicais tratados com cal.

O efeito da temperatura de cura na resistência à compressão simples de solos estabilizados com cal foi estudado por MENDONÇA *et al.* (1997), para dois tipos de solo: um latossolo ( $A_{7-5}$ , de acordo com a classificação HRB, índice de grupo IG = 20) e outro saprolítico de gnaiss ( $A_{7-5}$ , IG = 9), tratados com 2%, 6% e 10% de cal cálcica e curados à temperaturas de 22,8; 30; 50 e 70 °C. Os resultados mostraram que houve ganho substancial de resistência para todas as doses de cal aplicadas aos dois tipos de solo, ficando mais evidente no caso do latossolo; a resistência das misturas mostrou-se crescente com os aumentos do

tempo e da temperatura de cura, evidenciando a influência dos parâmetros estudados nas reações pozolânicas.

SVENSON (1981) estudou a estabilização de um solo podzólico vermelho amarelo, textura argilosa ( $A_{2-4}$ ,  $IG = 0$ ), com cal nos teores de 0, 3, e 5%, sendo os corpos-de-prova curados aos 14, 28 e 90 dias, em três condições de umidade, antes de serem ensaiados. Foram realizados ensaios de granulometria, de compressão simples, de tração na compressão diametral, de CBR, de compressão triaxial de carga repetida, assim como análise mineralógica.

Os resultados mostraram que, com relação ao peso específico aparente seco máximo, houve um decréscimo do seu valor com o acréscimo do teor de cal, enquanto que, para a umidade ótima, os aumentos foram proporcionais ao acréscimo do teor de cal. Para os valores de resistência à compressão simples, houve um acréscimo com o aumento do teor de cal aplicado, bem como com o tempo de cura, em relação ao solo natural. No entanto, para o teor de 3% de cal, houve uma diminuição de aproximadamente 5%, para os períodos de cura de 14 e 90 dias. No caso específico da resistência à tração na compressão diametral, houve um aumento com a adição da cal, ganho este não significativo com o acréscimo de 3 para 5%, nem com o acréscimo do tempo de cura. No ensaio de resiliência, os corpos-de-prova se romperam para tensões de aproximadamente 80% da tensão máxima de ruptura, obtida do ensaio de resistência à compressão simples; quanto à tensão confinante, houve uma diminuição das deformações com o seu acréscimo, sendo que os valores dos módulos resilientes cresceram com o seu aumento (SVENSON, 1981).

A estabilização de solos lateríticos tratados com teores variáveis de 0% a 9% de cimento foi objeto de estudo de VILLAR FILHO *et al.* (1982), que realizaram ensaios de compactação, de resistência à compressão simples, de resistência à tração indireta, e de durabilidade por perda de peso. Os testes de resistência à compressão simples indicaram a necessidade de um teor de cimento superior a

9% para se atingir a resistência mínima especificada pelas normas, enquanto que o teor de 5% se mostrou suficiente para estabilizar o solo, de acordo com o ensaio de durabilidade por molhamento e secagem.

O uso de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) na estabilização de solos lateríticos, visando uma possível utilização para fins de pavimentação, foi estudado, ao nível de laboratório, por GUIDA e MEDINA (1974), que trabalharam com quatro tipos de solo, um deles da região de Campinas, e cinco teores de ácido, a saber: 1, 2, 3, 4 e 5%, e diferentes energias de compactação. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que solos finos, tratados com ácido fosfórico, desenvolvem elevada resistência à compressão simples devido à cimentação das partículas, motivo pelo qual os autores sugeriram o emprego deste aditivo na estabilização de solos finos tropicais (MEDINA e GUIDA, 1996).

VERTAMATTI (1986) estudou a aplicabilidade dos aditivos cal, DS-328 e ácido fosfórico, na estabilização de solos finos da Amazônia; para isto, foram moldados corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura, nas condições e energia equivalentes às do Proctor normal, utilizando equipamento de dimensões reduzidas, sendo os corpos-de-prova rompidos por compressão simples após 7 dias de cura em meio saturado (no caso do solo-cal), ou após secagem prévia e imersão em água durante 4 dias (no caso do solo-DS-328); os corpos-de-prova confeccionados com ácido fosfórico (concentração de 30%), foram envoltos em material plástico e postos a curar em câmara úmida por 13 dias, sendo rompidos após um dia de imersão. VERTAMATTI (1986) concluiu que, para as condições do ensaio, os aditivos utilizados não levaram à profunda melhoria de qualidade nas amostras consideradas, sendo o efeito impermeabilizante observado apenas para o caso do DS-328.

AFLITOS e FERREIRA (1986) estudaram a utilização de cal e hidróxido de sódio (NaOH) como aditivos na estabilização de solos e suas influências nos parâmetros de plasticidade, compactação e resistência à compressão simples.

Para isto, corpos-de-prova cilíndricos foram submetidos à cura em câmara úmida, sendo acondicionados em sacos plásticos e soterrados em areia úmida durante 27 dias, e imersos em água 24 h antes de serem rompidos. A cal foi misturada diretamente ao solo enquanto que a soda cáustica foi diluída na água de amassamento, empregando-se teores de 1, 4, 7 e 10% para a cal e 0,3; 0,5; 1,2; 2,4 e 3,0% para a soda. A adição de cal reduziu consideravelmente o índice de plasticidade da mistura, enquanto que a soda teve comportamento similar ao de um desfloculante. A adição de soda cáustica inicialmente elevou o peso específico, para em seguida reduzi-lo; a umidade ótima comportou-se de forma inversa. A mistura solo-cal-soda apresentou valores de resistência maiores que os obtidos pelas misturas individualmente. Quanto ao ensaio de absorção, o aspecto amolecimento/desagregação foi melhorado após a imersão em água por 24 h. Teores elevados de soda (maiores que 3%) causaram reações exotérmicas e desagregação dos corpos-de-prova.

BRAZETTI (1997) estudou os mecanismos de interação organominerais que governam a estabilização de um latossolo roxo em mistura com três aditivos orgânicos, a saber: CON-AID, EMC<sup>2</sup> e TERRAFIX, aplicados de acordo com a especificação dos fabricantes, e avaliados através de ensaios não destrutivos (difratograma de raio-X), e outros ensaios, como: peso específico real dos grãos, análise granulométrica, limites de consistência, ensaio de cisalhamento, ensaios de CBR e ensaios de resistência à compressão simples e à tração.

A adição dos aditivos CON-AID, EMC<sup>2</sup> e TERRAFIX, ao latossolo Roxo, provocou uma diminuição no peso específico dos grãos, influenciando a curva granulométrica e modificando levemente os limites de liquidez e de plasticidade, bem como o ângulo de atrito e coesão do solo; os parâmetros de resistência à compressão e à tração, bem como o CBR, não foram afetados (BRAZETTI, 1997).

A aplicação do DS-328 na estabilização química de solos locais, que não atendem às especificações vigentes como elemento de base e sub-base, foi

estudada por BUSSAMRA (1997). As avaliações do pavimento e das dosagens utilizadas foram feitas através de levantamento deflectométrico com o auxílio da viga Benkelman, complementado com ensaios de laboratório, enquanto que o módulo de resiliência do sub-leito foi estimado através de correlações com o mini-CBR. A partir dos parâmetros do sub-leito e dos módulos da base e sub-base, obtidos através de ensaios, foi feita uma estimativa do número N de solicitações com carga padrão através do programa ELSYM-5, tendo o autor concluído pela viabilidade do DS-328 como estabilizador do solo latossolo roxo, e como agente controlador da erodibilidade do material.

CORRÊA e FELEX (1990) estudaram a adição de cal, nos teores de 3 e 5%, a um latossolo roxo; o material foi avaliado quanto ao seu comportamento como base e sub-base de pavimento, com espessura de 15 cm, para ambos os casos, e revestimento de 3 cm. A técnica de construção adotada para o solo-cal foi a mesma do solo-cimento.

Os corpos-de-prova, moldados durante a fase de construção, apresentaram valores de resistência à compressão simples, aos 7 dias, inferiores a 0,4 MPa e, aos 28 dias, inferiores a 0,7 MPa; a cura dos corpos-de-prova foi por via úmida, sendo os mesmos rompidos após 4 dias de imersão em água, em ensaios de CBR. As avaliações da pista indicaram, para a base de solo-cal, um comportamento estrutural mais próximo ao de pavimento flexível; os resultados dos ensaios estão indicados no Quadro 1.

Dentre os critérios de avaliação do material solo-cal, CORRÊA e FELEX (1990) afirmaram ser a resistência à compressão simples a mais utilizada, seguido pelo CBR; nenhum desses critérios, no entanto, é totalmente satisfatório, não ficando comprovada a eficiência da estabilização do latossolo roxo com cal.

**QUADRO 1** – Resultados obtidos com corpos-de-prova (CORRÊA e FELEX, 1990).

Origem do material	Teor de cal (%)	Nº de golpes	CBR (%)	Umidade (%)	$\gamma_{\text{máx}}$ (kN/m <sup>3</sup> )
Estaca 38 D	5	13	32	20,4	16,90
		28	57	20,5	17,80
		60	70	18,7	18,50

$\gamma_{\text{máx}}$  = Peso específico aparente seco máximo.

### 2 . 1 . 2 . Efeito do Látex no concreto

A ação do látex no concreto de cimento Portland foi descrita por SILVA et al. (1996), segundo os quais, quando o polímero é introduzido na argamassa ou no concreto fresco, as suas partículas se dispersam uniformemente na pasta de cimento Portland, e, enquanto nesta pasta se formam gradualmente os géis de silicato de cálcio hidratado, pela hidratação do cimento, a fase líquida torna-se saturada de hidróxido de cálcio. À medida que desenvolve-se a hidratação do cimento Portland, aumenta-se o teor de gel, e as partículas de látex são gradualmente confinadas nos poros capilares. Finalmente, com a remoção da água pela hidratação do cimento, as partículas compactas de látex se coadunam formando filmes contínuos ou membranas. Essas membranas ligam os géis hidratados e os agregados, formando uma massa monolítica em que a fase látex interpenetra através da fase do cimento hidratado. A associação das partículas do látex só ocorre nos pontos onde há ligação iônica silicato-cálcio. Esta associação das partículas do látex com a superfície do silicato de cálcio é irreversível e não pode ser destruída por lavagem em água ou em ácido hipoclorídrico.

Com respeito à combinação das partículas do polímero com a camada de silicato de cálcio, STORTE e TEZUKA (1992) explicaram ser irreversível a reação, pois as partículas de látex-polímero não podem ser removidas por ataque de solução de ácido clorídrico ou lavagem com água destilada, o que comprova a

aderência química entre as partículas. Para explicar o mecanismo que envolve essa reação entre o polímero e o íon cálcio, SILVA et al. (1996) e STORTE e TEZUKA (1992), sugeriram duas hipóteses:

- o íon cálcio reage com as ligações duplas do polímero;
- o íon cálcio reage com agentes tensoativos na superfície das partículas do polímero.

Algumas propriedades do concreto modificado com látex estão apresentadas no Quadro 2.

**QUADRO 2** - Concreto modificado com polímero (SILVA et al., 1996).

Parâmetros	Concreto convencional*	Concreto com polímero**
Resistência à compressão (MPa)	28,8 a 35,0	28,0 a 56,0
Resistência à tração (MPa)	2,1 a 2,5	4,0 a 6,5
Módulo de elasticidade (GPa)	20,0 a 25,0	4,0 a 6,5
Absorção de água (%)	5,0 a 6,0	-
Resistência à ácidos	-	10,0 a 6,0
Resistência à abrasão	-	10

\* Curados em câmara úmida

\*\* Curados em condições secas (50% de umidade relativa)

SILVA et al. (1996) enfatizaram que há uma quantidade mínima de polímero que deve ser utilizada, pois, quando esta quantidade for pequena para formar uma fase contínua, o polímero age como impureza e, como conseqüência, há um decréscimo na resistência do concreto. Quanto à cura, no concreto comum a condição ideal é a cura úmida durante longo período; no concreto com polímero, devido à formação de um filme na superfície que retém a umidade interna, para garantir a hidratação continuada do cimento é necessário geralmente um dia de

cura úmida, devendo o concreto, logo em seguida, ser mantido ao ar livre à temperaturas de 15 a 27 °C.

De acordo com STORTE e TEZUKA (1992), que estudaram a aplicação do polímero látex estireno-butadieno no concreto de cimento-polímero,

- ◆ ocorre uma redução na quantidade de água de amassamento com o aumento do teor de polímero e do consumo de cimento; para uma mesma trabalhabilidade, o concreto com adição de estireno-butadieno tem uma relação água/cimento menor;
- ◆ em todos os concretos modificados, a resistência à tração na flexão aumenta com o aumento da adição de estireno-butadieno;
- ◆ a resistência à compressão nos concretos de látex estireno-butadieno, em geral, alcançou e seu valor máximo com a adição de 10% de estireno-butadieno;
- ◆ todos os corpos-de-prova imersos em hipoclorito de sódio a 3% e hidróxido de sódio a 10%, não sofreram ataque químico.

Os polímeros também vêm sendo utilizados para melhorar as propriedades do cimento alfáltico de petróleo (CAP), tais como a resistência à formação de trilhas de roda, de trincas por fadiga, de fissuras térmicas, assim como a adesão asfalto/agregado e coesão; o polímero utilizado foi o copolímero estireno-butadieno; as propriedades mecânicas também foram aperfeiçoadas para as misturas resistirem a temperaturas de serviço na faixa de -30 °C a +86 °C (LEITE et al., 1995).

Vale salientar que todos os autores trabalharam com o produto polímero, e não com o resíduo, que, por sua vez, apresenta uma baixa concentração de látex.

### **2 . 1 . 3 . Cinza volante e cal**

O tempo de cura para rompimento de corpos-de-prova de solo estabilizado com cimento e seus efeitos aos 7, 21 e 90 dias, é um fato amplamente estudado; todavia, no que diz respeito a outros aditivos, como a cal, cal-cinza, cal-escória de alto-forno, cinza de casca-de-arroz, ácido fosfórico e tantos outros, existem, ainda, vários questionamentos, pois, em alguns casos, ocorrem reações pozolânicas que ultrapassam 7 dias, e continuam por muito mais tempo. Este fato vem sendo estudado e relatado por vários autores, como PINTO (1986), ALCANTARA *et al.* (1995), FOGAÇA e CERATTI (1996), AMORIM *et al.* (1996) e GUIMARÃES (1998).

O método de dimensionamento de pavimentos semi-rígidos, aplicado ao caso de bases pozolânicas de misturas solo-cal-cinza volante, é apresentado pelo DNER (1984), tendo sido esta metodologia usada na construção e avaliação de um trecho experimental da BR-101/SC (NARDIR, 1987); este trecho é constituído de 12 seções de 54 m de comprimento, perfazendo um total de 648 m de pavimentos. Os estudos de campo compreenderam a avaliação expedita das condições de superfície, medidas de deflexões, abertura de poços de sondagem para retirada de amostras das camadas do pavimento e ensaios dinâmicos “in situ” para determinação do módulo de elasticidade das misturas. No laboratório foram realizados ensaios de compressão diametral de carga repetida, para o revestimento, e ensaios de tração por compressão diametral e determinação do módulo de resiliência, para a base pozolânica. Os quatro tratamentos utilizados estão mostrados no Quadro 3, sendo a testemunha composta de 90% de brita e 10% de pó-de-pedra, e os seus resultados, no Quadro 4.

O módulo de elasticidade (E) foi determinado “in situ”, através do ensaio de ultra-som, com o equipamento PUNDIT.

A partir dos resultados obtidos e das avaliações realizadas foram feitas análises estruturais do pavimento, com auxílio do programa de simulação

FEPAVE; a partir dos módulos de resiliência dos materiais foram calculadas as tensões verticais ao longo da profundidade do pavimento e comparados os valores calculados com os medidos. Baseado nessas análises foi desenvolvido o método de projeto de pavimento semi-rígido.

**QUADRO 3** – Tratamentos utilizados pelo DNER (1984).

Tratamento	Areia (%)	Cinza (%)	Cal (%)	Cimento CP V-ARI (%)	Brita (%)
1	83	13	4	-	-
2	82	13	4	1	-
3	53	13	4	1	30
4	80	13	7	-	-

(%) porcentagem em peso de solo (areia) seco

**QUADRO 4** - Resultados dos ensaios realizados com amostras de solo-cal-cinza volante (DNER, 1984).

Tratamento	Módulo de resiliência (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência à tração na compressão diametral (MPa)
1	5.300	6.000	0,20
2	8.000	10.000	0,30
3	19.000	18.500	1,74
4	8.700	8.600	0,50

A estabilização química de solos arenosos locais, provenientes da região litorânea do Rio Grande do Sul, com cinza volante, cal e cimento de alta resistência inicial, foi estudada por FOGAÇA e CERATTI (1996), que, para isso, realizaram ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração na

compressão diametral e módulo de resiliência para períodos de cura de 7, 14, 28, 90 e 120 dias, além de ensaios de fadiga à flexão das misturas. Os tratamentos com estabilizadores químicos aplicados ao solo estão apresentados no Quadro 5.

**QUADRO 5** – Tratamentos (misturas) com estabilizadores químicos aplicados ao solo (FOGAÇA e CERATTI, 1996).

Mistura	Solo (%)	Cinza volante (%)	Cal (%)	CP V ARI (%)
1	70	23	7	-
2	68	23	9	-
3	70	23	7	1

A opção por cinza volante é justificada por se tratar de um resíduo utilizado em larga escala na região. A partir dos resultados obtidos e com o objetivo de prever o desempenho do material como base de pavimentos revestidos com uma camada de 5 cm de concreto asfáltico, os autores utilizaram o programa ELSYM 5 para simular o efeito causado pela aplicação de cargas, concluindo que, para uma mesma espessura, conforme aumenta o módulo de resiliência da base diminui a vida de fadiga, que, por sua vez, aumenta com a espessura da base e com o módulo de resiliência do sub-leito. Os autores propuseram, também, uma metodologia de dimensionamento preliminar a partir do módulo de resiliência do material cimentado e módulo de resiliência do sub-leito, definindo a vida de fadiga desejada (número N) de projeto, e, através de gráficos, a espessura mais adequada.

## **2 . 2 . Resíduos utilizados como estabilizadores em pavimentação**

Vários resíduos vêm sendo utilizados na estabilização de solos para fins de pavimentação. Nesse contexto, vários processos, como a solidificação,

encapsulamento, desintoxicação, e outros, foram desenvolvidos visando o aproveitamento e tratamento de tais resíduos.

### **2 . 2 . 1 . Licor negro Kraft**

No caso do licor negro Kraft, os investimentos para recuperação e tratamento desse resíduo resultante do processamento da celulose, estão em torno de 30 a 35% do custo total da instalação, o que levou muitas indústrias a despejarem-no em bacias de contenção ou diretamente nos cursos de água (ROSA, 1982).

VIEIRA (1993) estudou os efeitos da aplicação de licor negro Kraft concentrado, puro ou em combinação com cal e cimento, sobre a estabilização de solos na micro-região de Viçosa-MG, sendo utilizados dois latossolos e um saprolítico arenoso, classificados como A<sub>7-5</sub>, IG=10; A<sub>7-5</sub>, IG=16, e A<sub>2-4</sub>, IG=0, respectivamente; as dosagens de licor empregadas foram 0,0; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0%, em peso e em relação à mistura seca, sendo o licor concentrado a 14,37% de sólidos totais; tanto a cal como o cimento foram aplicados à razão de 2% em relação ao peso de solo seco.

Foram realizados ensaios de permeabilidade, de plasticidade, de compactação, de CBR e de compressão simples, assim como de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram uma diminuição do índice de plasticidade e do peso específico aparente seco máximo, e um aumento da umidade ótima, proporcional ao teor de licor utilizado.

A mistura solo-licor não proporcionou aumentos significativos na resistência à compressão simples de nenhum dos tratamentos. Enquanto as amostras de solo tratadas com 3% de cimento, curadas via úmida, não apresentaram ganhos significativos de resistência à compressão simples, as misturas solo-cal-licor mostraram um significativo acréscimo de resistência, para as menores doses de

licor empregadas. No caso específico do solo argiloso, tratado com licor-cal e licor-cimento, houve um pequeno ganho de resistência para a dose de 0,5% de licor, para cura em câmara úmida, e para a dose de 1% de licor, para a cura em incubadora (VIEIRA, 1993).

Quanto ao CBR, com imersão, para os solos tratados com licor, observou-se uma redução do seu valor, em relação ao solo natural. Para o caso do solo tratado com licor-cal-cimento não houve aumento de CBR, exceção feita para corpos-de-prova com solo-cal e solo-cimento. VIEIRA (1993) concluiu que o licor negro Kraft, usado como agente estabilizador de solos, não apresenta efeito significativo, sendo os corpos-de-prova susceptíveis ao ataque de fungos e agentes de degradação e variação de umidade.

### **2 . 2 . 2 . Escória de aciaria**

O uso de resíduos da indústria siderúrgica, no caso a escória de aciaria, como agregado, é relatado por SILVA (1994), que afirmou ser o material utilizado nas diversas camadas de pavimento como reforço do sub-leito, base e revestimento betuminoso, em substituição aos agregados pétreos, com a desvantagem de a expansão do material ser maior que 3,0%. Tais utilizações também foram estudadas por CAMPOS (1987), que afirmou serem as fissuras perpendiculares ao eixo da via, geradas em função das condições climáticas, um dos pontos fracos da utilização da brita escória tratada com ligantes hidráulicos.

### **2 . 2 . 3 . Escória de fosfogesso**

O uso de fosfogesso, por sua vez, foi estudado por CAJAZEIRAS *et al.* (1998) sob a perspectiva de sua utilização em estradas secundárias. Trata-se de um sub-produto resultante do processamento do ácido fosfórico, resultante do processamento do fertilizante, sendo sua fórmula idêntica à do gesso comum; tal material não apresenta risco ao meio ambiente. Compactado, apresenta um teor

de umidade ótimo em torno de 28% e um peso específico aparente seco máximo de 14,10 kN/m<sup>3</sup>; sua resistência à compressão simples é da ordem de 12,7 MPa, 90% da qual é alcançada após 8 h de cura, apenas. Os elementos obtidos do lixiviado não ultrapassam os limites máximos permitidos pelas normas (NBR-10005).

O fosfogesso também foi empregado em pavimentação por PARREIRA e OLIVA (1995) que utilizaram um solo A<sub>7-5</sub>, sendo as misturas ensaiadas em condições inundadas e secas; sob condições inundadas, os corpos-de-prova entravam em colapso, após os testes, problema este contornado com aquecimento prévio em estufa, por 24 h. As misturas de solo-fosfogesso nas doses de 0, 20, 40, 60, 80 e 100% de fosfogesso, foram homogeneizadas e submetidas ao ensaio de compactação, utilizando-se corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura, compactados na energia correspondente à do Proctor normal (PINTO, 1985). Após períodos de cura de 3, 7, 28 e 84 dias, os corpos-de-prova foram rompidos sob duas condições: com imersão (4 h) e sem imersão.

PARREIRA e OLIVA (1995) concluíram que o material resultante de misturas de solo-fosfogesso anidro é de qualidade satisfatória, podendo ser comparado às misturas de solo-cal ou de solo-cimento; a adição de quantidades crescentes de fosfogesso ao solo conduz a um ganho crescente de resistência; a imersão conduz a um decréscimo de resistência; a resistência aumenta com o tempo de cura até os 28 dias, tendendo a se estabilizar, ou mesmo a reduzir-se.

As características do percolado de misturas estabilizadas de fosfogesso com cimento, desenvolvidas para bases de estradas, foram pesquisadas por TITTLEBAUM *et al.* (1995), que, para isto, utilizaram dois níveis de compactação e quatro tipos de cimento, em duas dosagens. As misturas foram curadas aos 28 dias antes de serem ensaiadas, indicando os resultados uma redução do volume do lixiviado com a compactação em relação ao fosfogesso bruto.

## 2 . 2 . 4 . Entulhos

Os entulhos de construções, resíduos resultantes de demolições, reformas ou perdas de construções, são um grande problema nas regiões urbanas. BODI et al. (1995) apresentaram um estudo da utilização desse resíduo na pavimentação urbana, classificando-os, com a finalidade de se conhecer melhor os diferentes tipos e pontos da cidade, em:

- entulhos brancos - predominância de concretos e argamassas;
- entulhos vermelhos - materiais cerâmicos;
- entulhos mistos - brancos e vermelhos;
- entulhos contaminados - presença de plásticos, solo, madeiras etc.

Os entulhos classificados foram transformados em britas, sendo feitas as misturas solo/entulho/brita nas diversas proporções e realizados os ensaios de CBR, compactação e expansão, para dois tipo de solos, a saber: um siltoso (saprolítico) e outro argiloso (laterítico). Os resultados mostraram que o CBR das misturas solo/agregado britado com solo/entulho britado foram bons. BODI et al. (1995) creditam esta melhoria ao fato do entulho possuir suficiente carga de aglomerante, cimento e cal, capaz de promover, além da ação física, uma reação química. Quanto ao aspecto da expansão, verificou-se que ela é decrescente com o aumento da quantidade de entulho. Não se observou qualquer efeito sobre os parâmetros de compactação das misturas. Baseados nos resultados obtidos, os autores recomendaram que o entulho puro seja usado apenas em sub-bases de estradas.

PERA (1996) discorreu sobre a utilização de vários resíduos, na Europa Ocidental, em obras de pavimentação, na construção civil, na fabricação de cimento e de agregados leves, e em misturas alfálticas. Dentre esses destacam-se a cinza-volante, a escória de alto-forno, a cinza de incineração de resíduos municipais e industriais, bem como os resíduos resultantes da fabricação do ácido fosfórico (fosfogesso). O entulho de construção ou demolição, particularmente, tem sido muito utilizado como agregado em bases de estradas; o autor constatou

uma redução substancial, de aproximadamente 70%, no volume de material a ser disposto.

### **2 . 2 . 5 . Cinza de combustão e de incineração**

GRESS et al. (1991) utilizaram a cinza de combustão de resíduos sólidos municipais, produzidas num incinerador com capacidade de 500 t/dia, como substituto de agregados em concreto alfáltico; para isto, foram realizados ensaios de caracterização, determinação das propriedades do produto em função do tempo, desenvolvimento de misturas a quente e a frio para formulação de emulsões, avaliação das características do percolado liberado, além de medições do pH. Os resultados mostraram que as características dos materiais produzidos nas fornadas são praticamente constantes; outros ensaios físico-mecânicos também foram realizados, tais como ensaios de granulometria, absorção de água, peso específico, compactação, CBR, abrasão Los Angeles, compressão simples e estabilidade Marshall. Misturas contendo 25% de cinza de caldeira e 9% de cimento asfáltico foram incorporadas ao pavimento, do qual, após 7 dias de cura, foram retiradas amostras para a realização de ensaios de lixiviação. Os autores não encontraram grandes variações nas propriedades físico-químicas das amostras ensaiadas. Por outro lado, os valores de peso específico aparente variaram entre 20,0 e 22,4 kN/m<sup>3</sup>, indicando a possibilidade de uso da cinza de caldeira como agregado leve. As propriedades físicas dependentes do tempo se mostraram razoavelmente uniformes, sendo o material aceitável, tornando-se necessária uma avaliação econômica, da dosagem de cinza de caldeira no cimento asfáltico.

Vários produtos deliqüescentes foram estudados por GIUMMARRA et al. (1997) para eliminar o pó de estradas não pavimentadas, provocado pela ocorrência de ventos fortes, movimento de veículos, clima, etc., tais como:

- produtos hidrófilos (sais, cloretos);
- produtos orgânicos, não betuminosos (lignina, sulfatados);

- produtos eletroquímicos (sulfatados de petróleo, enzimas);
- óleos;
- produtos microbiológicos;
- polímeros (polivinil-clorídrico, PVA).

Seiscentos e cinquenta questionários foram distribuídos para autoridades locais da Austrália e da Nova Zelândia, referentes a estradas cujo tráfego tivesse volume diário médio (VDM) menor que 250, obtendo retorno de 36% das respostas. Os resultados mostraram que a durabilidade do tratamento, na maioria das vezes, não ultrapassava um ano. Além do mais, a retenção de pó das estradas resumia-se principalmente à retenção de finos, sendo que, para estradas de baixo volume de tráfego e baixo custo, o tratamento anti-pó não é sempre econômico, sendo sua seleção dependente da escolha do melhor estabilizador, de fatores climáticos, da composição do material e da superfície do pavimento (GIUMMARRA *et al.*, 1997).

## **2 . 2 . 6 . Cinza volante**

A cinza volante estabilizada com cimento e cal vem sendo utilizada para solidificação e desintoxicação de lodos (águas residuárias de petróleo). Testes de resistência à compressão simples foram realizados para determinação da melhor dosagem de cinza volante mais cimento ou cal, usando o silicato de sódio como acelerador de pega. Os resultados mostraram que o resíduo de petróleo semi-líquido foi solidificado (JOSHI *et al.*, 1995). Ensaio experimental para fins de caracterização ambiental da mistura cinza volante e lama de cal também foram realizados por GABR *et al.* (1995).

A utilização de sub-produtos industriais como agregados para bases de pavimento foi estudada por DAWSON *et al.* (1995), principalmente a escória de alto-forno e de aciaria, resíduos de carvão mineral, cacos de ardósia, cinza pesada e cinza volante e resíduos de demolição de construções. Como

aglomerantes, foram utilizadas misturas betuminosas e cimento Portland, assim como misturas de escória de alto-forno e cal. As misturas foram testadas em laboratório, em escala piloto, com resultados similares aos de materiais convencionais, embora alguns destes necessitem de um beneficiamento prévio, como os resíduos de demolição.

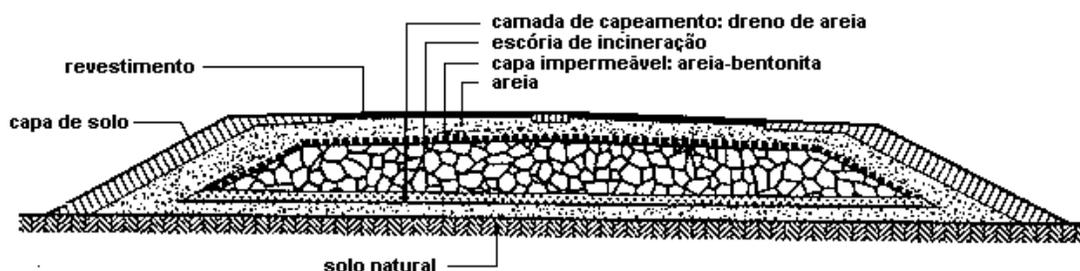
O uso de resíduos é muito comum na Iugoslávia, onde cerca de 90% do cimento contém, na sua mistura, resíduos como escória, cinza volante e pozolanas. A prática tem confirmado, ao longo do tempo, o uso desses resíduos no cimento, tendo sido aperfeiçoadas propriedades como durabilidade química, redução do calor de hidratação, entre outras (POPOVIC et al., 1991).

De acordo com MANK et al. (1991) a aplicação de escória proveniente da incineração de resíduos domésticos, em aterros de estradas, na Holanda, é prática similar à dos resíduos leves industriais. A esse resíduo, caracterizado por seu baixo poder poluente, pode-se acrescentar cinza volante, após separação prévia dos metais pesados. A escória contém, também, metais pesados, dependendo da natureza do resíduo incinerado; sendo assim, não deve ser aplicada em áreas críticas, ou com problemas de lençol freático a pequena profundidade. Todos os componentes, incinerados ou não, devem ser compactados, devendo ser observados os aspectos técnicos e ambientais. Ensaio geotécnicos para determinação de parâmetros como coesão, coeficiente de atrito, resistência à compressão, permeabilidade e infiltração, foram realizados, bem como o monitoramento de suas propriedades ao longo do tempo (MANK et al., 1991). A Figura 1 mostra detalhes do aterro.

### **2 . 2 . 7 . Borra de carbureto**

Objetivando a conservação do revestimento primário de estradas de terra que dão acesso aos oleodutos da Petrobrás, na Serra do Mar, na qual se exige condição de tráfego permanente ao longo do ano, e na impossibilidade de

aproveitamento dos solos locais, AUGUSTO JUNIOR e CUNHA (1990) decidiram pela utilização da borra de carbureto, resíduo de fabricação do gás acetileno, misturada aos solos saprolíticos locais, nos teores de 10, 15 e 20% de resíduo, em relação ao peso do solo seco. Foram realizados ensaios de compactação mini-Proctor e moldados corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura destinados aos ensaios de resistência à compressão simples; os corpos-de-prova foram rompidos aos 7, 14, 28 e 90 dias de cura, em câmara úmida, tendo sido imersos em água durante 4 h, antes do rompimento.



**FIGURA 1** - Projeto de um aterro de estrada (MANK et al., 1991).

A partir dos valores de resistência à compressão simples obtidos em laboratório, foi construído um trecho de 900 m de comprimento, com declividade variando de 2 a 21%, com a dose de 10% do resíduo "borra de carbureto". Após compactada, a camada era umedecida duas vezes ao dia, durante um período de 7 dias. Durante a construção, foram moldados corpos-de-prova que, após cura em câmara úmida, foram rompidos à compressão simples, obtendo-se valores médios de resistência da ordem de 3,70 MPa. Baseados em valores obtidos para solos de outras jazidas e na avaliação do trecho 21 meses após sua construção, AUGUSTO JUNIOR e CUNHA (1990) concluíram que:

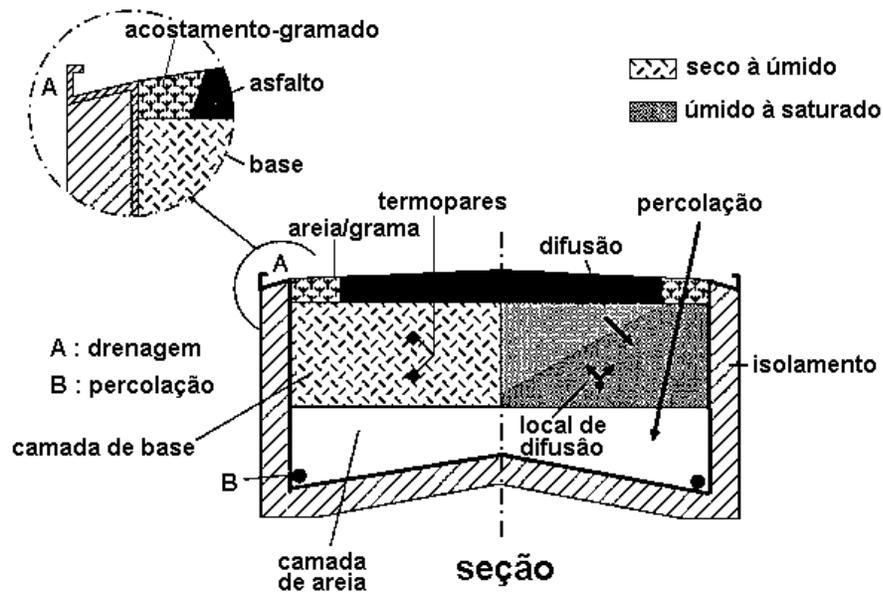
- resíduo "borra de carbureto" não apresentou bom desempenho nos solos testados;

- somente um estudo de laboratório mais apurado é capaz de identificar quais argilo-minerais reagem satisfatoriamente;
- com relação ao solo da pista, os valores de resistência à compressão simples indicaram que o resíduo reagiu satisfatoriamente com os seus constituintes.

### **2 . 2 . 8 . Resíduos diversos**

As características do lixiviado de materiais primários e secundários, aplicados em bases de estradas, foram estudadas por MULDER (1991), estando o esquema da seção piloto do pavimento mostrado na Figura 2. Os resíduos avaliados foram escória de incineração, lixo doméstico, cinza pesada, entulho de demolição, escória de fosfogesso e de aciaria, cinza volante e cimento estabilizado, e solo-cimento. A experimentação, em escala piloto, passou por um período de avaliação de dois anos, sendo a área de exposição de 1,00 x 2,00 m e tendo a base espessura de 20 cm, aproximadamente; os tratamentos (resíduos) foram aplicados sobre uma camada drenante de areia de aproximadamente 20 cm; o revestimento foi composto de uma camada de asfalto, com 5 cm de espessura. No interior da camada, monitorou-se a temperatura, através de termopares. Durante o período de monitoramento, as quantidades percoladas e escoadas, através de escoamento superficial, foram analisadas quimicamente.

MULDER (1991), estudando os percolados de escória, cinza pesada, lavalite, fosfogesso e areia, concluiu que eles eram quimicamente neutros (pH 7 e 8). Nas análises, pequenas quantidades de sedimentos filtrados destes percolados provavelmente eram constituídos de manganês e/ou complexos de ferro, que foram lixiviados da camada de areia. Os demais percolados, resultantes de concretos de demolição, mistura de cinza de caldeira, escória de aciaria, cinza volante estabilizada com cimento e solo-cimento, eram fortemente alcalinos (pH 12 a 12,5). Grandes quantidade de sedimentos que foram encontrados nestes percolados, poderiam ser constituídos, em sua maior parte, de ácidos húmicos lixiviados da camada de areia pelo percolado fortemente alcalino.



**FIGURA 2** - Esquema da seção piloto do pavimento utilizado por MULDER (1991).

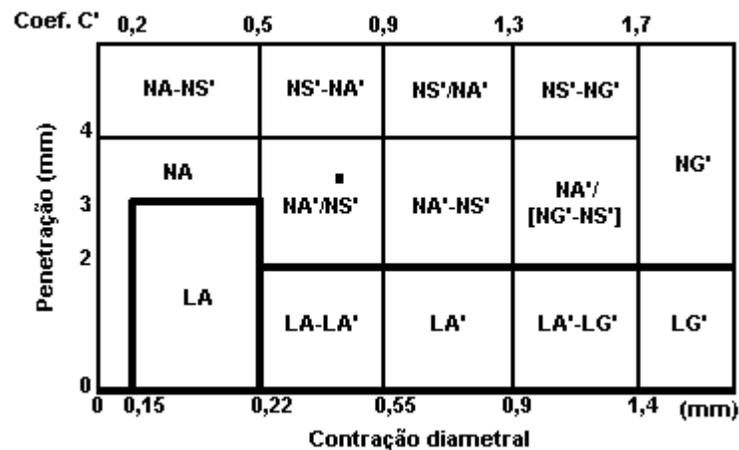
### 2.3. Alguns ensaios aplicados à pavimentação

A tecnologia MCT (Miniatura Compactada Tropical) surgiu da necessidade de adaptações dos procedimentos tradicionais aplicados aos solos das regiões tropicais. O primeiro ensaio desenvolvido foi o mini-CBR (NOGAMI, 1972), baseado nos procedimentos da Iowa State University, adaptado para se correlacionar com o CBR convencional. As principais adaptações trazidas com o mini-CBR foram corpos-de-prova de dimensões reduzidas e soquetes de seção plena (PINTO, 1965).

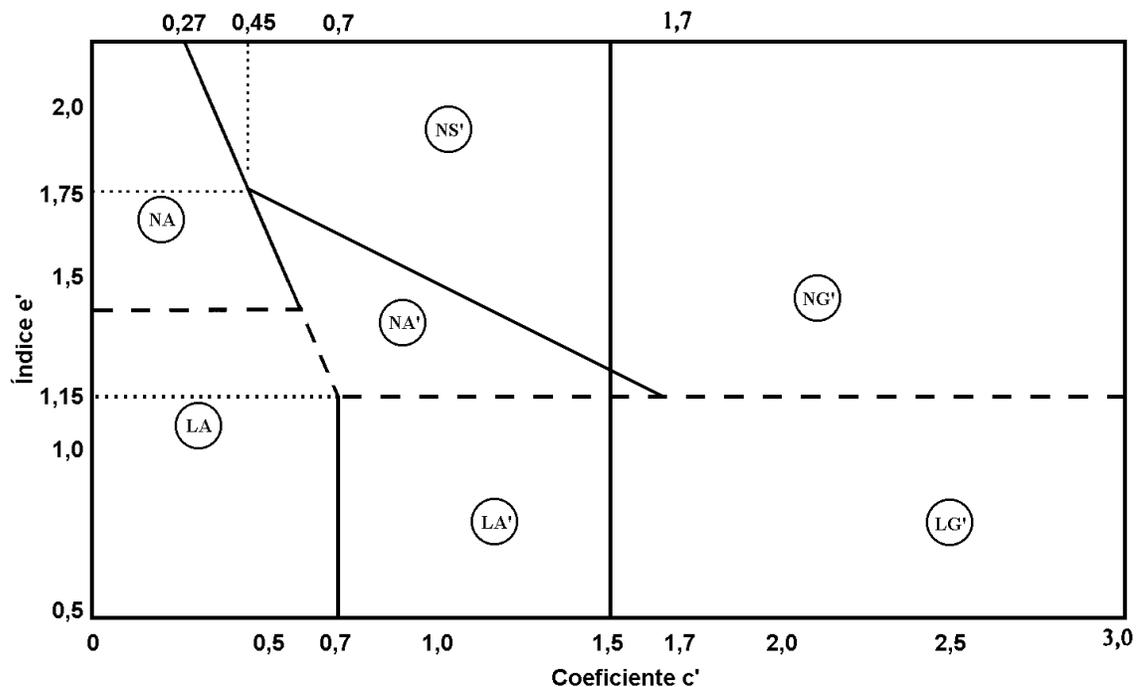
Posteriormente, outros ensaios foram incorporados à metodologia (NOGAMI e VILLIBOR, 1979), tais como o índice mini-CBR sem imersão, o ensaio de contração, o de infiltrabilidade e permeabilidade, a perda de massa por imersão

em água (um dos parâmetros de classificação geotécnica MCT), o de pastilhas, etc.

O sistema de classificação divide os solos tropicais em dois grupos, a saber: lateríticos e saprolíticos. Os ensaios para definição dos índices baseiam-se na determinação das características apresentadas por corpos-de-prova de solo compactados, de 50 mm de diâmetro, apropriados para solos de granulação fina, material que passa na peneira n<sup>o</sup> 10 (2,0 mm). Pode-se, também, fazer uma classificação preliminar (Figura 3) a partir dos parâmetros de contração e de penetração de um penetrômetro padrão (NOGAMI e VILLIBOR, 1996). Os grupos de solos estão mostrados na Figura 4.



**FIGURA 3** – Gráfico para classificação MCT pelo método das pastilhas (GODOY et al., 1998).



**FIGURA 4** – Gráfico da classificação MCT.

### 2 . 3 . 1 . Módulo de resiliência

Com o avanço dos recursos computacionais, o cálculo das tensões e deformações de estruturas de pavimento por meio do sistema de multi-camadas foi muito facilitado. Segundo o modelo elástico, tais camadas são caracterizadas pelo seu módulo de resiliência e pelo seu coeficiente de Poisson (YORDER e WICTIZAK, 1975), sendo que, para a utilização do modelo elástico, deve-se considerar os casos de elasticidades linear e não-linear. No modelo linear, cada camada é considerada perfeitamente elástica, homogênea e isotrópica, ou seja, o módulo e o coeficiente de Poisson são considerados constantes para cada camada pavimento/sub-leito, com suas respectivas espessuras, sendo o sub-leito de espessura infinita, aplicando-se as hipóteses de Burmister para análise das tensões e deformações, e empregando-se o programa ELSYM5 para o cálculo destes parâmetros.

Na elasticidade não-linear, os valores do módulo de resiliência e do coeficiente de Poisson podem variar ponto a ponto, numa mesma camada, aplicando-se, neste caso, o método dos elementos infinitos.

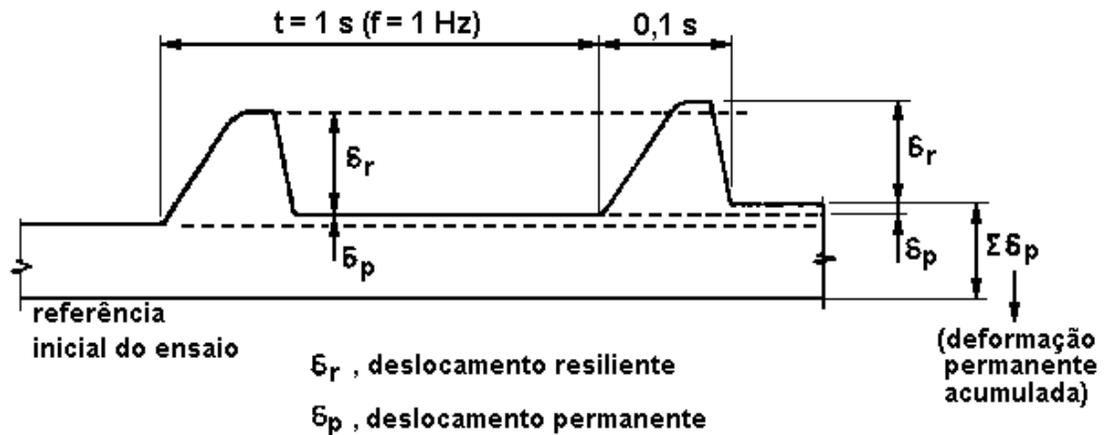
Vem daí a necessidade de se conhecer os parâmetros módulo de resiliência e coeficiente de Poisson, determinados sob condições similares às do campo, e a necessidade de se conhecer e correlacionar o comportamento dos materiais com os modelos de comportamento resiliente, a fim de que possam ser aplicados ao dimensionamento de pavimentos (MEDINA, 1997).

A máquina de ensaio triaxial tradicional é composta por uma câmara triaxial, pressurizada com o auxílio de água ou ar comprimido, na qual é gerada uma pressão de confinamento sobre o corpo-de-prova de solo. O carregamento vertical (tensão desvio) é efetuado pela aplicação de uma força estática que gera tensões de cisalhamento no solo, podendo a drenagem da amostra ser controlada ou medida.

Em mecânica dos pavimentos, segundo MEDINA e PREUSSLER (1980), deformação resiliente é a deformação elástica ou recuperável, de solos e estruturas de pavimentos, sob ação de cargas transientes ou repetidas. O termo resiliência foi adotado por Hveem em 1955; conceitualmente, não existem solos resilientes e solos não resilientes, pois que todos eles apresentam deformação resiliente (MEDINA e PREUSSLER, 1980). Esta, somada à deformação permanente, dá a deformação total. Na Figura 5 estão mostrados, de forma esquemática, esses deslocamentos.

Não há efeito da duração e freqüência das cargas no módulo resiliente, pois são freqüências da ordem de 20 a 60 ciclos por minuto e duração de 0,86 a 2,86 segundos, aplicadas nos corpos-de-prova moldados no teor de umidade próximo ao da ótima. O módulo resiliente de solos vem sendo pesquisado no laboratório de

mecânica dos solos da COPPE/UFRJ desde fins de 1977. A Figura 6 mostra um esquema geral do equipamento utilizado por MEDINA (1997). Outros ensaios também vêm sendo feitos, como o ensaio dinâmico de tração por compressão diametral ou tração indireta.



**FIGURA 5** - Deformações permanente e resiliente (MEDINA, 1997).

Define-se módulo resiliente, numericamente, como sendo:

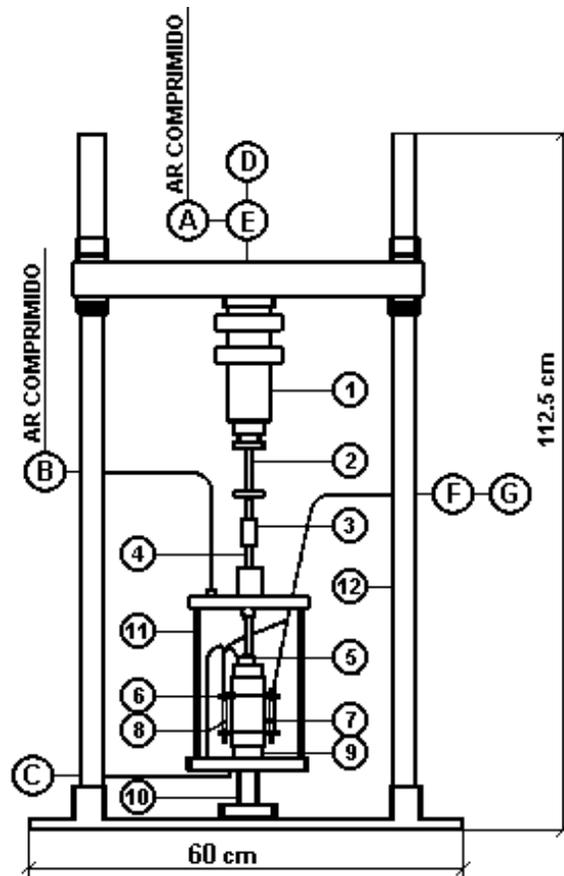
$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

onde:

**Mr** - módulo resiliente

$\sigma_d$  - tensão desvio

$\epsilon_R$  - deformação específica vertical



Item	Descrição
A	Regulador de pressão para aplicação da tensão desvio
B	Regulador de pressão para aplicação da tensão confinante
C	Sistema para vácuo
D	Temporizador de controle da frequência e tempo de duração do carregamento
E	Válvula de três vias
F	Amplificador de sinal
G	Oscilógrafo ou aquisição de dados
1	Cilindro de pressão
2	Pistão
3	Conexão
4	Haste
5	Cabeçote
6	LVDT
7	Amostra de solo
8	Alça de fixação do LVDT
9	Base
10	Suporte central
11	Célula Triaxial
12	Estrutura da prensa

**FIGURA 6** - Esquema do equipamento triaxial utilizado por MEDINA (1997).

A realização do ensaio triaxial dinâmico é usualmente feita sob pressão confinante constante e os corpos-de-prova são não saturados. São ensaios dinâmicos à baixa frequência de aplicação de cargas, compatíveis com o tráfego dos veículos nas estradas. Os solos arenosos, particularmente, têm módulo resiliente dependente da tensão confinante, pouco afetado pela tensão desvio (carregamento vertical), enquanto que os argilosos têm módulo dependente da tensão desvio e pouco atingidos pela tensão confinante (MEDINA e PREUSSLER, 1980); nos solos arenosos, os efeitos do número de repetições de carga podem ser diminuídos ou eliminados através de ciclos de carregamento, enquanto que, nos solos argilosos, as deformações resilientes diminuem com o número de aplicações de carga.

No caso de deformações plásticas, os efeitos são diminuídos ou eliminados através de um pré-condicionamento, ou seja, ciclos alternados de carregamento e descarregamento. A função do condicionamento é eliminar grandes deformações permanentes, como nos períodos pós-construção, movimento de partículas ou fraturas delas, com as deformações permanentes diminuindo até tornarem-se nulas ou muito pequenas. A partir deste condicionamento, o solo, inicialmente elástico não-linear, torna-se praticamente elástico, e as deformações causadas pelo carregamento tornam-se recuperáveis ou resilientes e o módulo, determinado a partir de certo número de repetições de carga, permanece constante (PREUSSLER, 1983).

O módulo de resiliência diminui muito, principalmente com o aumento da umidade de compactação. A compactação no teor de umidade ótimo ou acima dele é recomendável. O método de compactação (estático, dinâmico, por amassamento, etc.) faz-se sentir mais nos solos argilosos no teor de umidade abaixo do ótimo (MEDINA e PREUSSLER, 1980).

Mais tarde, MEDINA (1985) apresentou uma classificação para solos argilosos lateríticos (com mais de 50% de suas partículas passando na peneira n<sup>o</sup>

200), relacionando a porcentagem de silte nos finos, e fazendo uma avaliação desses solos em sub-leitos e camadas de pavimento. MEDINA *et al.* (1986) descreveram modelos matemáticos de comportamento resiliente ou de deformabilidade elástica para solos granulares, coesivos (solos argilosos, compactados na umidade ótima) e combinados (solos siltosos e argilosos), constatando que os solos lateríticos, com finos e forte cimentação natural, apresentam módulos de resiliência constantes que atingem valores da ordem de 4.000 MPa ou mais, próximos da gama de solos estabilizados com aditivos, e indicando o ensaio triaxial dinâmico como passo para simular o efeito da repetição de carga nos pavimentos.

MOTTA *et al.* (1985) realizaram estudos com solos de características lateríticas através do ensaio triaxial de carga repetida, obtidos de pavimentos de baixo custo nos Estados do Paraná, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e São Paulo, para o estabelecimento de modelos de regressão para previsão de módulos de resiliência. As amostras, na maioria dos casos, pertenciam a pavimentos com tratamento superficial duplo, como camada de revestimento. Os corpos-de-prova, de 5 x 10 cm, foram obtidos de amostras indeformadas, quando possível, ou compactadas nas mesmas condições das de campo. Após a análise dos resultados, MOTTA *et al.* (1985) observaram uma certa compatibilidade entre o ensaio de resiliência, aplicado para quantificar as qualidades dos materiais locais, com a forma de trabalho das camadas de pavimento; constataram, também, uma diferença de comportamento na relação tensão x deformação entre um material no seu estado natural e depois de compactado, assim como o efeito da estabilização no módulo de resiliência.

### **2 . 3 . 2 . Modelos aplicados à resiliência de solos**

Os gráficos e equações que representam tais comportamentos estão mostrados na Figura 7, dela concluindo-se que, para:

- comportamento argiloso,  $M_r = f(\sigma_d)$ ;

- comportamento granular,  $M_r = f(\sigma_3)$ ;
- comportamento constante, independe do estado de tensões;
- comportamento intermediário ou misto,  $M_r = f(\sigma_3, \sigma_d)$ .

Por sua vez, FRANZOI (1990) estudou a resiliência de solos tropicais fazendo uma abordagem dos fatores que influenciam seu comportamento resiliente. A autora realizou uma série de ensaios triaxiais, de carga repetida, com dez tipos de solos tropicais (6 lateríticos e 4 saprolíticos), sob diferentes condições de umidade, peso específico, pressões confinantes e tensões-desvio, para diferentes procedimentos de condicionamento e, principalmente, condições de drenagem; considerações sobre a influência da drenagem nos resultados obtidos, a compatibilidade dos modelos aplicados aos solos tropicais, e uma tentativa de correlação do módulo de resiliência com o CBR, foram também feitas e estudadas.

Para solos finos, no quais  $M_r = f(\sigma_d)$ , em escala aritmética, bi-linear, tem-se baixas tensões-desvio, verificadas a grandes profundidades e pequenas deformações, tornando pequena a contribuição do sub-leito e resultando, para a base e sub-base, a maior contribuição na ocorrência de deflexões. Por isso SVENSON (1980) sugeriu o modelo exponencial  $M_r = k_1(\sigma_d)^{k_2}$ , em escala log-log, semelhante à do modelo arenoso, porém com  $k_2$  negativo, que também foi utilizado por MOTTA e PINTO (1994).

Para solos coesivos, argilosos, MOTTA e PINTO (1994) estabeleceram uma correlação entre o número de repetições de carga e a deformação permanente, expressa através da seguinte fórmula:

$$\varepsilon_p = k_1 \times N^{k_2}$$

onde:

$\varepsilon_p$  – deformação permanente

$k_1, k_2$  – parâmetros do ensaio

$N$  – número de repetições de carga.

SANTOS *et al.* (1995) também fizeram uso dessa fórmula, aplicando-a um estado de tensões ( $\sigma_d = 105$  e  $\sigma_3 = 315$ ) em kPa, para 100.000 repetições de carga.

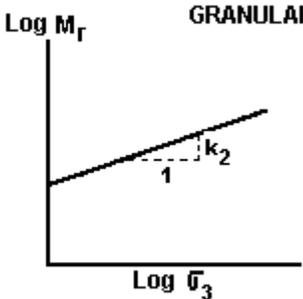
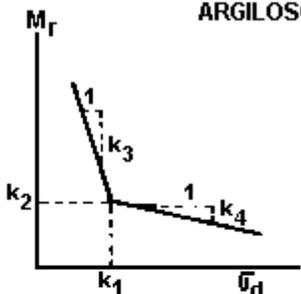
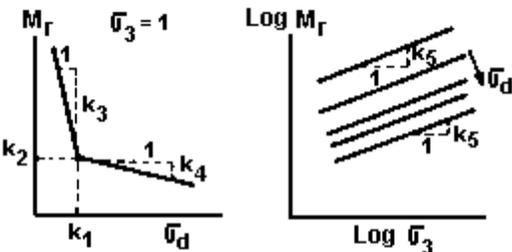
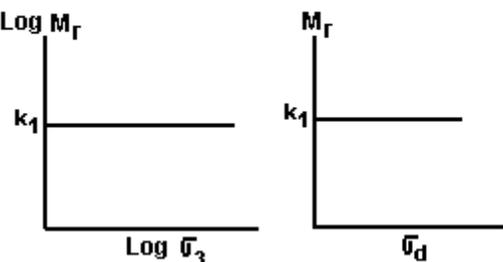
Modelo	Equação
<p style="text-align: center;"><b>GRANULAR</b></p> 	$M_r = K_1 \bar{\sigma}_3^{k_2}$
<p style="text-align: center;"><b>ARGILOSO</b></p> 	$M_i = K_2 + K_3 (K_1 - \bar{\sigma}_d) \bar{\sigma}_d < K_1$ $M_i = K_2 + K_3 (\bar{\sigma}_d - K_1) \bar{\sigma}_d > K_1$
<p style="text-align: center;"><b>COMBINADO</b></p> 	$M_i = K_2 + K_3 (K_1 - \bar{\sigma}_d) \bar{\sigma}_d < K_1$ $M_i = K_2 + K_3 (\bar{\sigma}_d - K_1) \bar{\sigma}_d > K_1$ $M_r = M_i \bar{\sigma}_3^{k_5}$
<p style="text-align: center;"><b>CONSTANTE</b></p> 	$M_r = k_1 = \text{Constante}$

FIGURA 7 – Modelos de módulo de resiliência (MEDINA *et al.*, 1986).

### 2 . 3 . 3 . Correlação entre o módulo de resiliência e o CBR

A partir da análise de vinte solos arenosos, siltosos e argilosos, MEDINA e PREUSSLER (1980) procuraram estabelecer uma correlação entre o módulo de resiliência e o CBR, de modo que se pudesse classificar os solos em função de suas propriedades resilientes.

A correlação entre o módulo de resiliência e o CBR, para solos argilosos e arenosos, foi proposta por Heukelom e Klomp, citados por VISSER *et al.* (1983). Normalmente, o valor da constante é da ordem de 10,4 (Figura 8), variando entre 0,7 a 106,0, correlacionando-se da seguinte forma:

$$M_r = K \cdot \text{CBR (em MPa)}$$

Para os solos brasileiros, tropicais, o CBR, embebido, e o módulo de resiliência, se correlacionaram negativamente, embora houvesse uma correspondência entre os módulos estático, elástico e dinâmico (VISSER *et al.*, 1983).

O DNER (1996) apresentou uma classificação de solos baseada em suas propriedades resilientes, dividindo-os em dois grupos: solos granulares e solos finos. Os solos granulares, aqueles que apresentam menos de 35% (em peso) de material passando na peneira nº 200 (0,075 mm), subdividem-se em três grupos cujo comportamento resiliente é dado pela expressão:

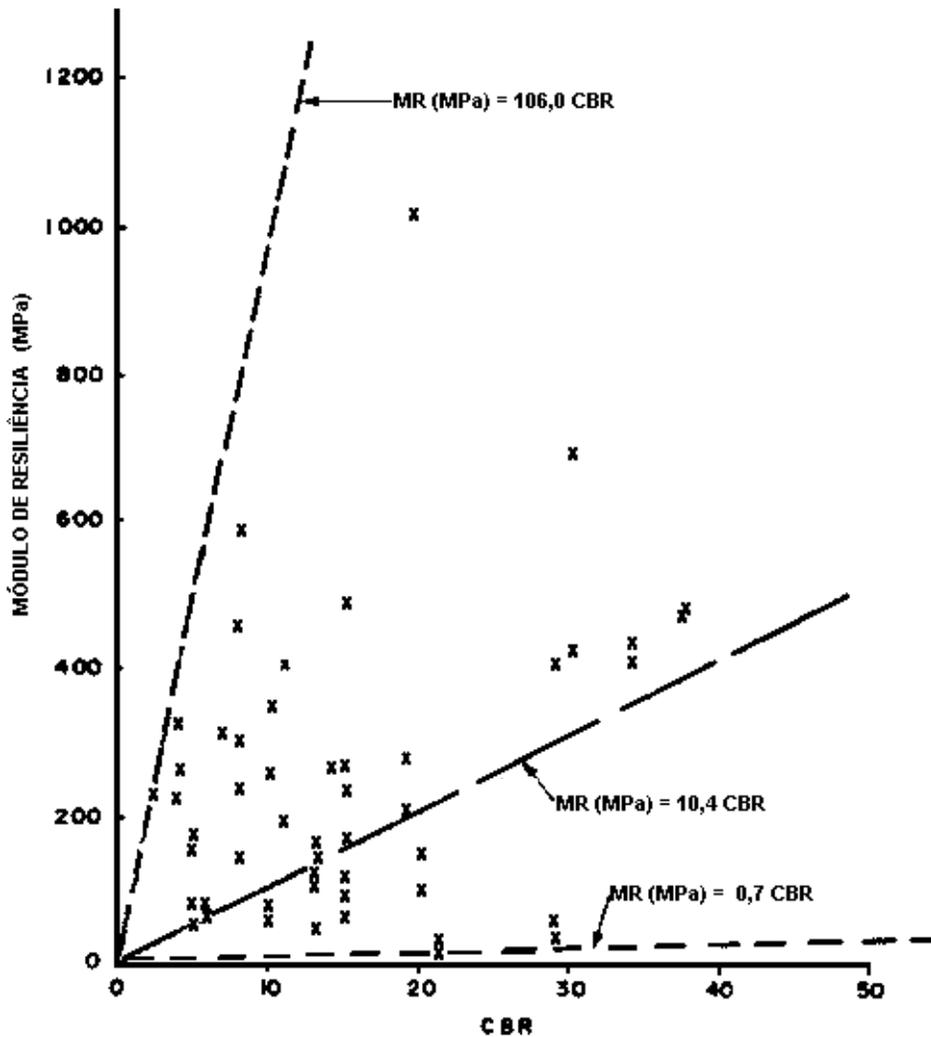
$$M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$$

- Grupo A - solos com grau de resiliência elevado - não devem ser empregados em estruturas de pavimentos, constituindo sub-leitos de péssima qualidade;
- Grupo B - solos com grau de resiliência intermediário - podem ser utilizados em bases, sub-bases e reforço do sub-leito, sendo que para:

$$K_2 \leq 0,50 \text{ - bom comportamento;}$$

$K_2 > 0,50$  - comportamento que depende da espessura da camada;

- Grupo C - solos com baixo grau de resiliência - podem ser usados em todas as camadas, gerando estruturas com baixas deflexões.



**FIGURA 8** - Relação entre o módulo de resiliência e CBR (VISSER *et al.*, 1983).

Solos finos, aqueles que apresentam mais de 35% em peso de material passando na peneira nº 200, são classificados, quanto à resiliência, em três tipos:

- Tipo I - Solos de bom comportamento como sub-leito e reforço, podendo, também, ser utilizados como sub-base;
- Tipo II - Solos de comportamento regular como sub-leito e reforço;
- Tipo III - Solos de comportamento ruim, sendo vedado seu uso em camadas de pavimento (PREUSSLER e PINTO, 1983; DNER, 1996).

Solos finos podem ser classificados, quanto à resiliência, em função do CBR e da porcentagem de silte na fração fina (Quadro 6).

**QUADRO 6** - Classificação dos solos finos de acordo com o seu CBR e a porcentagem de silte nos finos.

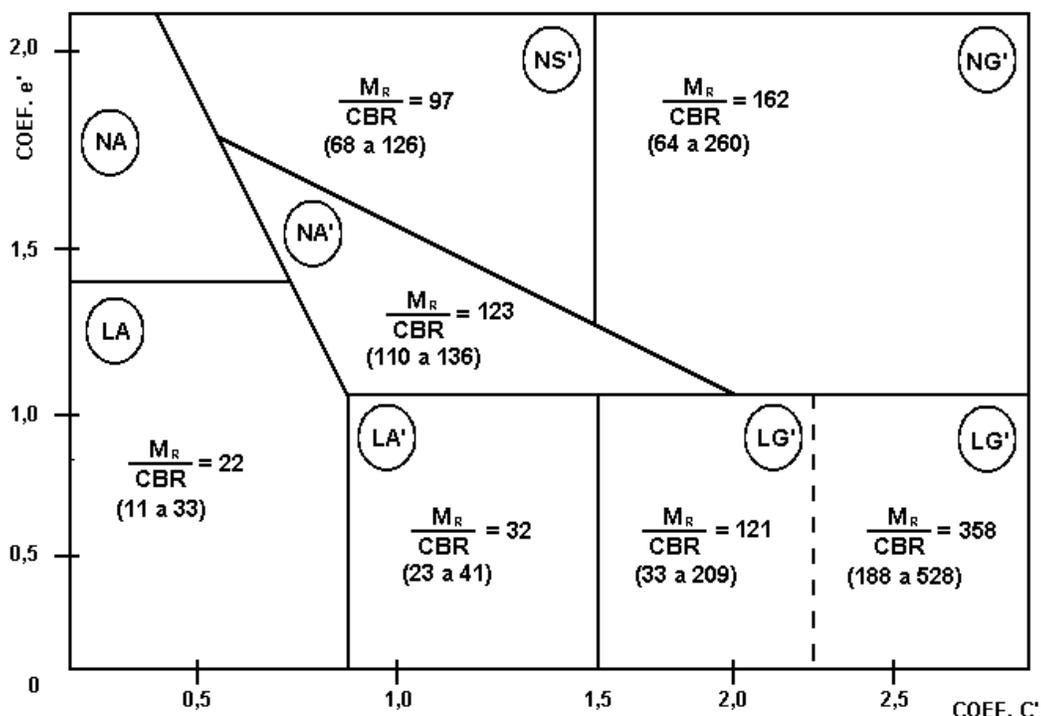
CBR	Porcentagem de silte nos finos		
	≤ 35%	35 – 65%	≥ 65%
≤ 5%	III	III	III
6 – 9%	II	II	III
≥ 10%	I	II	III

Fonte: DNER (1996).

Solos granulares têm resistência à penetração elevada devido ao atrito intergranular e ao entrosamento das partículas, ao mesmo tempo em que sua deformabilidade elástica tende a ser elevada, pois as partículas têm liberdade para rolar umas sobre as outras devido à baixa coesão e à pequena influência das forças de campo. Em solos coesivos, a resistência à penetração tende a ser baixa pois as partículas são plaquetas com baixo grau de entrosamento, e sua deformabilidade elástica também tende a ser baixa devido aos campos eletromagnéticos que existem entre as partículas, os quais se opõem aos seus deslocamentos relativos (DNER, 1996).

A Figura 9 apresenta a classificação MCT para solos finos e a relação entre

o módulo resiliente e o CBR.



**FIGURA 9** - Classificação MCT para solos finos e relação do módulo resiliente com o CBR (DNER, 1996).

Porisso, a relação  $M_R/CBR$  para solos finos é mais elevada do que nos solos granulares, uma vez que o módulo mede a deformabilidade elástica do solo, enquanto o CBR se relaciona com a resistência do solo saturado (DNER, 1996).

Cerca de 60% do território dos EUA é submetido a invernos rigorosos, com penetração do congelamento em profundidade até o sub-leito, seguido do degelo primaveril, que satura literalmente o pavimento. Por estes motivos e a fim de se evitar as conseqüências danosas do congelamento no inverno e o degelo na primavera, especifica-se, nos EUA, para camadas de base e sub-base, a

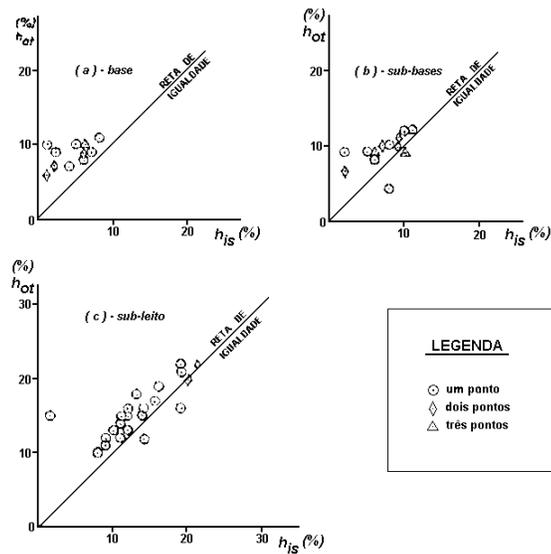
utilização de material granular, motivo pelo qual os ensaios de capacidade de suporte também são realizados para condições saturadas (MEDINA, 1997).

Para MEDINA (1997), a umidade de equilíbrio do sub-leito é o valor médio da gama de variação do teor de umidade do solo ao longo do ano, após a fase de acomodação nos primeiros meses de serviço. Experimentalmente, tem-se verificado que, em rodovias com sistema de drenagem, a umidade de equilíbrio pode ser considerada igual ou inferior ao teor de umidade ótimo do ensaio de compactação normal de Proctor.

Por sua vez, Souza, citado por MEDINA (1997), avaliando o Método de Pavimento Flexível do DNER, baseado no ensaio de CBR e utilizando amostras embebidas durante 96 h, constatou que a umidade natural, determinada por ocasião das sondagens, em trechos homogêneos, era quase sempre inferior à umidade ótima. Observou, também, que os valores de CBR “in situ” eram quase sempre superiores aos obtidos em amostras compactadas em laboratório (Figura 10).

Tal fato também foi constatado por LUCENA *et al.* (1994) que, realizando estudos no Estado da Paraíba, após a estação de chuva, visando a determinação da umidade de equilíbrio de bases, sub-bases e sub-leitos de estradas pavimentadas, concluíram que o teor de umidade de campo está geralmente abaixo da umidade ótima obtida em laboratório.

Para o Estado de São Paulo, segundo VILLIBOR (1981), a umidade de equilíbrio, em pavimentos que utilizam solos lateríticos, não se altera praticamente durante o ano, situando-se ao redor de 80 a 90% da umidade ótima de compactação, para bases, sem apresentar qualquer variação ao longo do ano, no caso de sub-leitos.



**FIGURA 10** - Relação entre umidade de equilíbrio e umidade de campo para sub-leito, base e sub-base (MEDINA, 1997).

MOTTA et al. (1985) observaram que o grau de compactação obtido em condições de campo é menor do que aquele obtido em condições de laboratório, e que a umidade de campo, na maioria dos casos, é menor que a umidade ótima de laboratório.

### **3 . MATERIAIS E MÉTODOS**

Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais, do Departamento de Construções Rurais da Faculdade de Engenharia Agrícola, e nos laboratórios da Faculdade de Engenharia Civil, ambas da Universidade Estadual de Campinas, enquanto que os ensaios para determinação do módulo de resiliência bem como os ensaios segundo a metodologia MCT, foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, do Departamento de Engenharia de Transportes, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

#### **3 . 1 . Materiais**

##### **3 . 1 . 1 . Solo**

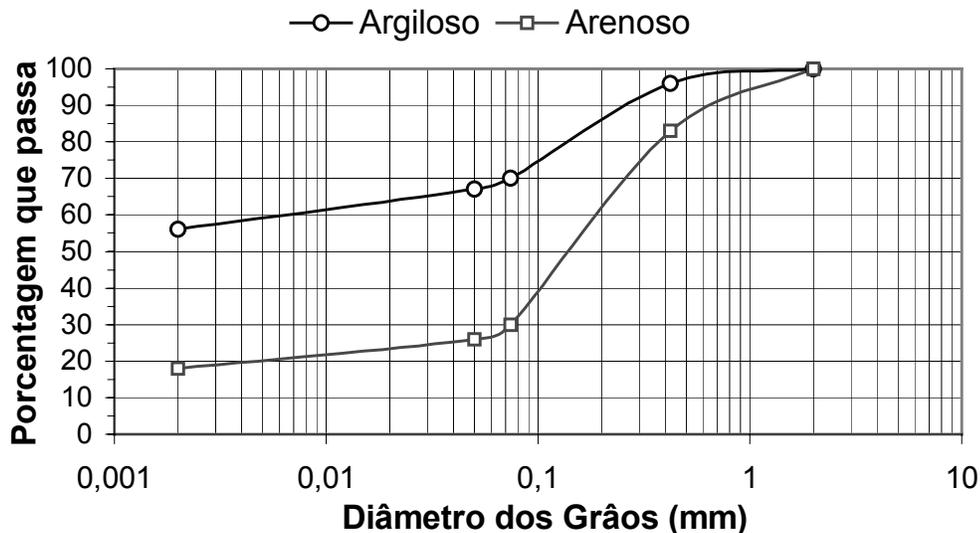
Os solos utilizados, a saber, um arenoso e outro argiloso, foram coletados em jazidas distintas, ambas localizadas na área física da RHODIA, município de Paulínia-SP, a aproximadamente 20 km de Campinas. Procurou-se trabalhar com tipos de solos que abrangessem classes texturais distintas e, principalmente, solos locais. As suas características estão registradas no Quadro 7, e a curva granulométrica, na Figura 11.

Os valores médios anuais de precipitação e temperatura, característicos da região, são 1364 mm e 20,6 °C, respectivamente. O relevo apresenta-se suavemente ondulado, com altitude média de 690 m. O tipo climático é definido como Cwa (mesotérmico de inverno seco), de acordo com a classificação de Köppen.

**QUADRO 7** - Características físicas dos solos estudados.

Parâmetros		Solo	
		Argiloso	Arenoso
Composição Textural (% em peso)	Areia grossa (0,42-2,00 mm)	4	14
	Areia fina (0,05-0,42 mm)	29	60
	Silte (0,005-0,02 mm)	11	8
	Argila (< 0,002 mm)	56	18
Limites de Consistência (%)	Limite de liquidez	38,29	NP*
	Limite de plasticidade	29,34	NP
	Índice de Plasticidade	8,95	NP
Classificação	AASHTO	A <sub>6</sub>	A <sub>2-4</sub>
	Bureau of Public Roads	Argiloso	Arenoso
	MCT	LG'	LA'
Peso específico dos sólidos (kN/m <sup>3</sup> )		28,42	26,57

\* NP = Não plástico



**FIGURA 11** – Curva granulométrica do solo argiloso e arenoso.

De acordo com a classificação MCT para solos tropicais (NOGAMI e VILLIBOR, 1995), os solos LG', argilosos e argilo-arenosos, constituintes do horizonte B e pedologicamente conhecidos por latossolos, podzóis ou terra roxa estruturada, possuem menor capacidade de suporte, menores módulos de

resiliência, maior plasticidade, menor peso específico seco, e maior umidade ótima para a mesma energia de compactação, além de maior contração por perda de umidade. Por outro lado, são mais resistentes à erosão hidráulica, quando devidamente compactados. No seu estado natural, apresentam freqüentemente colapsividade por imersão em água, são altamente permeáveis e costumam dar taludes de cortes não sujeitos à erosão.

Os solos classificados como LA' são tipicamente arenosos e constituintes do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente no Brasil por latossolos arenosos e podzólicos ou podzolizados arenosos (textura média). Esses solos, além da presença dos matizes vermelho-amarelo, dão cortes firmes (pouco ou não erodíveis). Quando compactados, adquirem elevada capacidade de suporte, elevado módulo de resiliência, baixa permeabilidade, pequena contração por perda de umidade e pequena expansão (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

### **3 . 1 . 2 . Cal**

A cal hidratada (comercial) utilizada foi aquela de marca ITAÚ.

A opção por cal hidratada, como aditivo, se fez por tratar-se de um material amplamente utilizado no tratamento de resíduos (precipitação, mudança de pH, tratamento de águas de lavagem). O teor de 3% foi escolhido a partir de ensaios preliminares realizados, principalmente porque teores mais elevados (5% de cal) não alteraram significativamente a resistência à compressão simples do material ensaiado; por outro lado, no presente trabalho procurou-se estudar não apenas a estabilização solo-cal, mas também as características físicas e mecânicas da combinação solo-resíduo-cal.

### **3 . 1 . 3 . Resíduo**

A água-de-cola, resíduo líquido resultante da lavagem no processamento da “cola branca” ou Poliacetato de Vinila (PVA), foi fornecida pela indústria RHODIA do Brasil Ltda. O resíduo foi utilizado na forma “in natura” (0,5% de PVA) e nas concentrações de 5% e 10%.

A opção por “cola branca” na forma concentrada deveu-se ao fato de que a adição do resíduo "in natura" não apresentou ganhos significativos de resistência em relação ao solo natural (testemunha). As concentrações de 5% e 10% foram escolhidas porque valores superiores a estes não apresentaram, também, ganhos significativos de resistência à compressão simples.

### **3 . 1 . 4 . Equipamentos**

Foram utilizados equipamentos dos Laboratórios das Faculdade de Engenharia Agrícola e de Engenharia Civil da UNICAMP, e da Escola Politécnica da USP, tais como prensas universal (VEB Werkstoffprüfmaschinen, capacidade de 25 tf) e de CBR, cilindros de Proctor e de CBR, prensa triaxial de carga repetida, cilindros de mini-CBR, espátulas, estufas, etc.

## **3 . 2 . Métodos**

### **3 . 2 . 1 . Ensaio de caracterização ambiental do resíduo e do solo incorporado com resíduo**

O resíduo água-de-cola foi classificado, preliminarmente, segundo a norma técnica NBR-10004, da ABNT, como sendo resíduo não perigoso; todavia, embora seja um efluente líquido, apresenta particularidades que tornam inviável o seu lançamento em corpos de água.

De acordo com aquela norma, os resíduos sólidos são classificados em três classes, a saber:

Classe I – perigosos;

Classe II – não inerte;

Classe III – inerte.

Os resíduos perigosos (Classe I) são aqueles que apresentam periculosidade, em função de suas propriedades física, química ou infecto-contagiosa, podendo apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente. Os resíduos classe II (não inertes) são aqueles que não se enquadram como Classe I, podendo apresentar propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Nos resíduos classe III (inertes), quando submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente (teste de solubilidade, NBR – 10006), os constituintes solubilizados apresentam concentrações não superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando cor, turbidez e sabor.

A fim de classificar o resíduo de acordo com a norma NBR – 10004, estabeleceu-se um plano de trabalho de acordo com o fluxograma sugerido pela CETESB (1985), mostrado na Figura 12. Para a realização do plano, foi feita uma pré-classificação do resíduo, através de levantamento, onde constam tipos de formulações, relação das matérias-primas utilizadas no processo produtivo e relação dos principais sub-produtos. Esses dados não estão incluídos no presente trabalho.

A amostragem foi realizada de acordo com a norma NBR – 10007, em três diferentes dias, com a unidade industrial operando em sua capacidade máxima, sendo o ponto de amostragem o reservatório, fossa de efluente. Ainda para efeito de classificação, foram utilizadas as normas NBR – 10006 e NBR – 10005, que se referem à solubilização e lixiviação de resíduos.

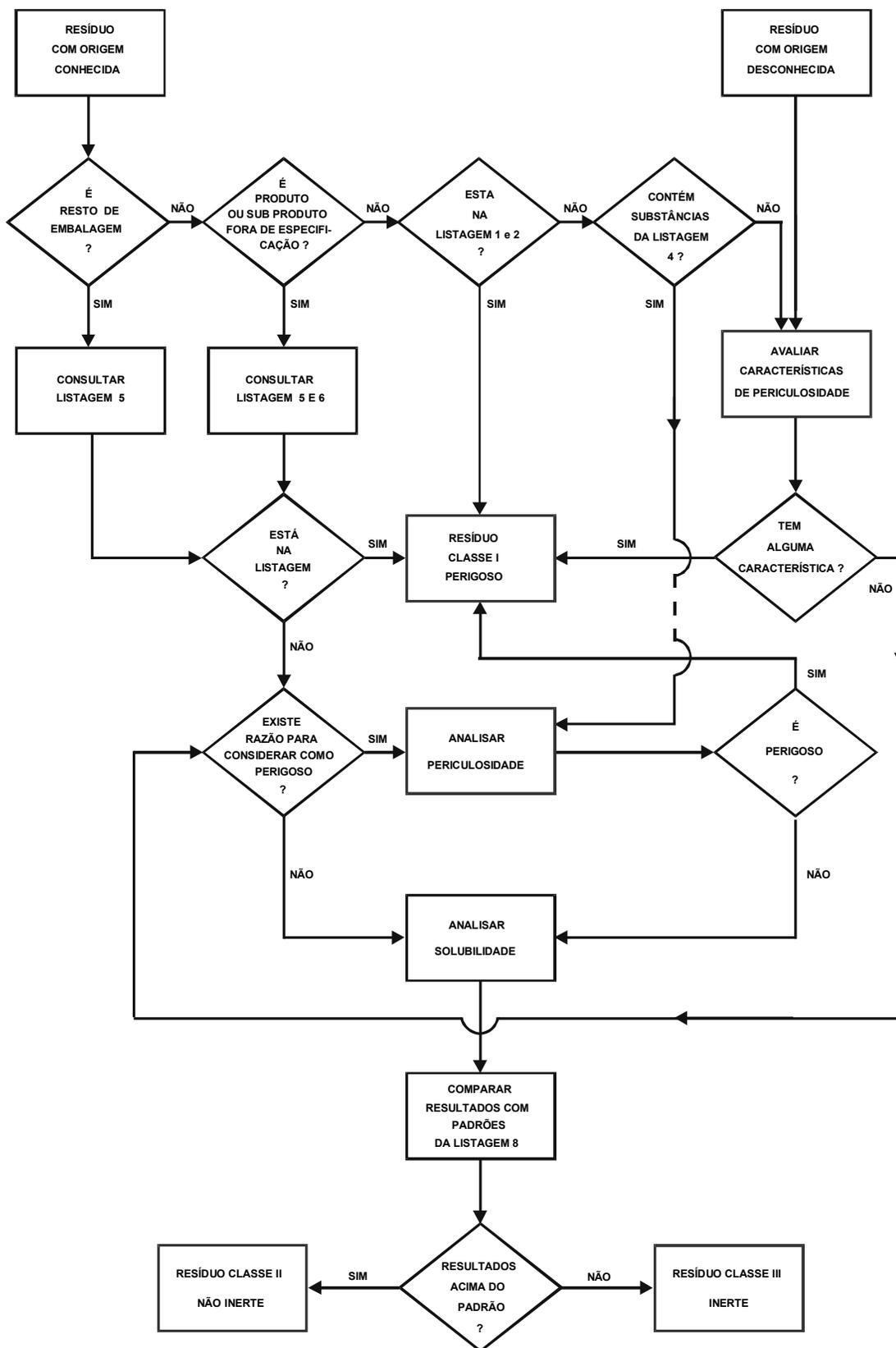


FIGURA 12 – Fluxograma para classificação de resíduo (CETESB, 1985).

### 3 . 2 . 2 . Aplicação dos tratamentos

Os tratamentos compreenderam a aplicação de diferentes doses de água-de-cola, nas concentrações de 0% (testemunha), 5% e 10%, aos dois tipos de solo estudados, sendo a dose de 15% para o solo argiloso e a de 8% para o solo arenoso, em relação ao peso da mistura seca; o aditivo utilizado foi a cal, na dose de 3%, em relação ao peso do solo seco, para ambos os solos, compreendendo 12 tratamentos conduzidos com 3 repetições. As doses e concentrações do resíduo, bem como as do aditivo, foram escolhidas a partir dos resultados fornecidos pelos ensaios preliminares realizados e dos resultados parciais obtidos, estando a configuração dos tratamentos mostrada no Quadro 8.

**QUADRO 8** – Definição dos tratamentos utilizados nos ensaios de laboratório.

Tratamento	Tipo de solo	Cal (kg/100 kg)	Concentração de (água-de-cola)	Dose (kg/100 kg)
T1	Argiloso	0	0%	0
T2		0	5%	15
T3		0	10%	15
T4		3	0%	15
T5		3	5%	15
T6		3	10%	15
T7	Arenoso	0	0%	0
T8		0	5%	8
T9		0	10%	8
T10		3	0%	8
T11		3	5%	8
T12		3	10%	8

Trabalhando com resíduo líquido em doses superiores ao teor de umidade ótimo, para o solo arenoso, e próximas do ótimo, para o solo argiloso, aliados à umidade higroscópica do solo, ROLIM (1996) encontrou grandes dificuldades nas operações de incorporação do resíduo ao solo, secagem, destorroamento e peneiramento das misturas de solo-resíduo.

Os teores de água-de-cola escolhidos representam o máximo de resíduo incorporado à mistura, sem prejuízo da compactação.

Na aplicação dos tratamentos com o resíduo "água-de-cola", em todos os casos utilizou-se a fração de solo passante na peneira nº 4 (abertura de malha igual a 4,76 mm).

As amostras de solo coletadas das jazidas e destinadas aos ensaios, foram secas ao sol, destorroadas com auxílio de um almofariz, peneiradas (peneira nº 4) e, em seguida, acondicionadas em uma caixa de plástico. Antes da realização dos ensaios determinava-se o teor de umidade das amostras de solo e de solo-resíduo, após a aplicação dos tratamentos e a devida homogeneização. Excepcionalmente, nos ensaios do módulo de resiliência e da tecnologia MCT (mini-Proctor e mini-CBR), as amostras de solo foram peneiradas em peneira nº 10 (2,00 mm), homogeneizadas, etiquetadas e depositadas numa caixa de isopor, por um período de 24 h, novamente homogeneizadas, e, em seguida, submetidas aos ensaios. Segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995), devido ao volume reduzido do corpo-de-prova (mini-Proctor), o material não é re-utilizado, bastando apenas um umedecimento prévio do mesmo.

### **3 . 2 . 3 . Ensaio de caracterização do solo e do solo-resíduo**

A preparação das amostras de solo, para os ensaios de caracterização e de compactação, foi feita de acordo com a norma NBR-6457, enquanto que a preparação das amostras de solo-água-de-cola, para o ensaio de compactação, foi feita à semelhança daquela do solo-cimento. Os ensaios de caracterização foram os seguintes:

- determinação do teor de umidade do solo e da mistura solo-água-de-cola pelo método da estufa a 105 °C, durante 24 h;

- determinação do peso específico dos grãos do solo de acordo com a norma NBR-6508;
- análise granulométrica, por sedimentação e peneiramento, utilizando a fração do material passante na peneira nº 10 (2,0 mm de abertura de malha) e procedendo-se de acordo com a norma NBR-7181.

#### **3 . 2 . 4 . Classificação do solo segundo a metodologia MCT**

A preparação das amostras para os ensaios de caracterização do solo, segundo a metodologia MCT, foi realizada de acordo com o item 3.2.4.

A classificação dos solos, segundo a metodologia MCT (Miniatura Compactada para solos Tropicais), foi feita de acordo com os procedimentos adotados por NOGAMI (1989), sendo os solos classificados como sendo lateríticos e não-lateríticos.

#### **Classificação preliminar**

O ensaio de pastilha foi feito de acordo com as recomendações de NOGAMI e VILLIBOR (1995), com modificações implementadas por GODOY et al. (1997), permitindo estudar as características do solo, tais como granulometria, umidade, consistência, expansão, penetração, resistência ao esmagamento e coesão.

Das características observadas no ensaio de pastilhas MCT, duas são mais importantes para a classificação preliminar MCT: a contração diametral por secagem de pastilhas de solo e a penetração de uma agulha padronizada, na pastilha de solo, após reabsorção de água pela sua base. Esses parâmetros estão relacionados com o coeficiente  $c'$  (contração) e a penetração com o índice  $e'$  da metodologia MCT, como pode ser visto na Figura 3 (NOGAMI e VILLIBOR, 1994).

Os parâmetros de contração se relacionam com as trincas e a compressibilidade dos solos compactados, enquanto que a penetração se relaciona com a coesão e a resistência desses solos em presença de água.

Para o ensaio de pastilhas MCT, utilizou-se a fração do solo passante na peneira nº 40 (0,42 mm), enquanto que a fração retida foi pesada, determinando-se a proporção de cada fração. Da porção passante na peneira nº 40, cerca de 50 g foram umedecidas com água destilada e deixadas em repouso por 12 h; em seguida, o material foi destorroado, com auxílio de uma espátula, sobre uma placa de vidro fosco durante 8 min, com a finalidade de desfazer os agregados e liberar a fração argila.

A amostra, camada de solo de 1 cm de espessura depositada sobre o vidro fosco, foi mantida continuamente umedecida, sendo homogeneizada e espatulada até se alcançar uma penetração padrão de 1 mm, da agulha de 1,3 mm do penetrômetro de 10 g de peso. Permite-se, no ensaio, novo umedecimento ou mesmo secagem da amostra através de circulação de ar, até obter-se a penetração padrão estabelecida.

Satisfeita aquela condição, três anéis de aço inox, de 20 mm de diâmetro interno e 5 mm de altura, foram preenchidos com solo e levados à estufa, a 60 °C, durante 6 h.

Com o restante do material espatulado, foram confeccionadas esferas, semelhantes a bolas de gude, utilizadas para a determinação da umidade da amostra. Após secagem em estufa, as esferas foram pesadas, ao mesmo tempo em que se verificava sua resistência ao esmagamento e seu comportamento quando imersa em água.

Após retiradas da estufa, as pastilhas foram deixadas a secar ao ar livre e à sombra, por um período de 15 minutos, para então serem feitas 9 medições de

contração, com auxílio de paquímetro e lupa, determinando-se a média, cujo valor foi utilizado no gráfico da Figura 3. Três dos anéis foram colocados em uma superfície de placa porosa, saturada em água e recoberta com papel filtro, placa esta que tem as seguintes características: espessura de 5 mm, permeabilidade de  $10^{-2}$  cm/s e capacidade de manter pressão negativa de aproximadamente 5 mm de coluna de água. Também foram registrados o tempo de ascensão capilar da água durante 2 h, a expansão dimensional, o aparecimento de trincas, e efetuadas as medidas de penetração que, juntamente com os valores de contração, permitem a classificação preliminar do solo quanto à metodologia MCT.

### **Classificação do solo (MCT)**

A classificação geotécnica MCT baseia-se na determinação das propriedades obtidas de corpos-de-prova compactados de solo, de 50 mm de diâmetro, apropriadas para solos de granulação fina, utilizando-se o material que passa na peneira nº 10 (2,00 mm). Para se classificar o solo, compacta-se uma amostra de solo de aproximadamente 200 g de peso, aplicando-se tantos golpes de soquete de seção plena quantos forem necessários para se conseguir diferenças de medidas de altura menores que 0,1 mm.

Com os dados obtidos traça-se uma família de curvas de compactação, sendo o coeficiente  $d'$  a inclinação da parte retilínea do ramo seco, correspondente a 12 golpes;  $P_i$  é a perda de massa por imersão em água;  $c'$  é o coeficiente angular que passa pelo ponto mini-MCV 10. Com os valores obtidos calcula-se o  $e'$  através da expressão:

$$e' = \sqrt[3]{\frac{pi}{100}} + \frac{20}{d'}$$

Com os valores de  $e'$  e  $c'$ , introduzidos no gráfico da Figura 4, pode-se classificar o solo em grupos.

A metodologia utilizada difere da empregada por NOGAMI e VILLIBOR (1995) pelo fato de serem cinco os corpos-de-prova com valores crescentes de umidade, e a seqüência de golpes ser 3, 6, 10, 20, 40 e 80. Os golpes do soquete são interrompidos quando a diferença de altura for menor que 1 mm. Obtém-se, também, o valor da perda de massa por imersão em água, assim como os demais valores dos coeficientes.

### **3 . 2 . 5 . Determinação dos limites de consistência**

A determinação dos limites de consistência foi feita unicamente para o solo argiloso, uma vez que o solo arenoso revelou-se não plástico (NP), assim como o solo com resíduo incorporado. Assim, foram determinados os

- limites de liquidez (NBR-0659);
- limites de plasticidade (NBR-7180).

### **3 . 2 . 6 . Ensaio de compactação**

#### **Ensaio de compactação normal de Proctor**

Os ensaios de compactação normal de Proctor, aplicados ao solo para determinação da peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima correspondente, foram realizados de acordo com a norma NBR-7182, enquanto que, para o solo-resíduo, procedeu-se de forma análoga à do solo-cimento, tomando-se por base a norma NBR-12023.

## Ensaio de compactação mini-Proctor

O ensaio de mini-Proctor, na energia normal, foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 228/94. Os corpos-de-prova foram compactados com soquete de peso 2,270 kg, com aplicações de 5 golpes em cada face, seção plena, diâmetro do soquete igual ao do molde (5,0 cm), altura de queda de 30 cm e dispositivo para medição da altura do corpo-de-prova (NOGAMI, 1989), conforme Figuras 13, 14 e 15.



**FIGURA 13** – Detalhe da compactação mini-Proctor.



**FIGURA 14** – Dispositivo de medição da altura do corpo-de-prova.



**FIGURA 15** – Dispositivo de extração do corpo-de-prova.

### **3 . 2 . 7 . Moldagem e cura de corpos-de-prova**

A moldagem de corpos-de-prova de solo e de solo-água-de-cola foi feita de maneira semelhante à moldagem de corpos-de-prova de solo-cimento, de acordo com a norma NBR-12024.

Nos ensaios preliminares, a cura dos corpos-de-prova destinados aos ensaios de compressão simples, com a idade de 21 dias, foi feita da seguinte maneira:

- 21 dias de cura ao ar livre e à sombra;
- 2 dias de cura ao ar livre e à sombra, seguidos de 19 dias de cura sob condições úmidas.

Para os corpos-de-prova destinados aos ensaios de compressão simples e tração na compressão diametral, aos 14, 21, 90 e 180 dias, a cura foi feita da seguinte maneira:

- 1 dia de cura ao ar livre e à sombra, e o restante sob condições úmidas.

### **3 . 2 . 8 . Índice de suporte Califórnia-CBR**

O índice de suporte Califórnia foi realizado de três formas diferentes, a saber, o CBR tradicional, o CBR – Adaptado, e o mini-CBR.

#### **Índice de suporte Califórnia tradicional (ABNT NBR – 09895)**

A determinação dos índices de suporte Califórnia das amostras de solo e solo-resíduo foi feita de acordo com a norma NBR-09895, sendo os corpos-de-prova moldados de acordo com os parâmetros de compactação obtidos do Proctor normal.

Para os corpos-de-prova ensaiados aos 21 dias, durante a fase preliminar a cura foi feita da seguinte maneira:

- 2 dias de cura ao ar livre e à sombra, seguidos de 19 dias sob condições úmidas;
- 21 dias de cura ao ar livre e à sombra;
- 17 dias de cura ao ar livre e à sombra, seguidos de 4 dias em imersão (96 horas).

### **Índice de suporte mini-CBR**

O ensaio de mini-CBR, proposto por NOGAMI (1972), surgiu da necessidade de se determinar a capacidade de suporte dos solos ao longo das rodovias, sendo realizado de acordo com a norma DNER-ME 254/94.

As amostras foram moldadas na umidade e peso específico aparente seco máximo obtidos do ensaio de compactação mini-Proctor. Após moldados, os corpos-de-prova, juntamente com os cilindros, foram envoltos com filme plástico e acondicionados em uma caixa de isopor durante 21 dias de cura, até o dia do ensaio. As condições aplicadas ao ensaio, com sobrecarga, foram:

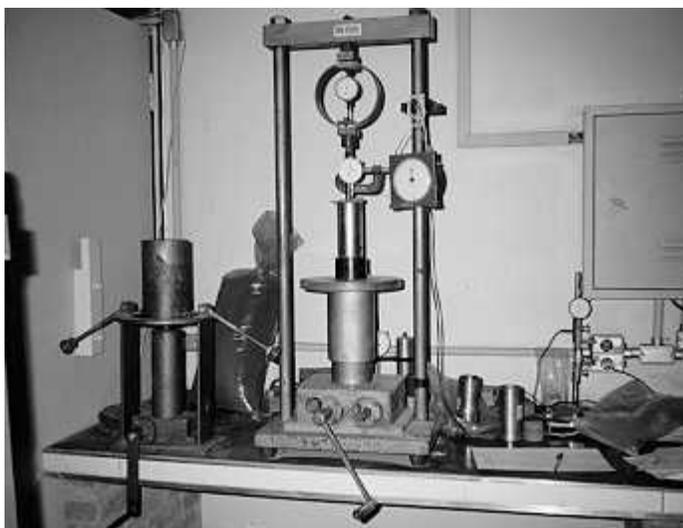
- com imersão - após submeter o corpo-de-prova em imersão total em água, durante 20 horas;
- sem imersão - com o corpo-de-prova não submetido à imersão em água, porém, úmido.

As cargas correspondentes às leituras (Figura 16), juntamente com as respectivas penetrações, foram levadas ao gráfico, sendo traçada pelos pontos a curva, corrigida se necessário, determinando-se as cargas correspondente às penetrações de 2,0 mm e 2,5 mm. O mini-CBR foi obtido através das seguintes correlações:

$$\log (\text{Mini-CBR}.1) = 0,254 + 0,896 \times \log C1$$

$$\log (\text{Mini-CBR}.2) = 0,356 + 0,937 \times \log C2$$

C1 e C2 são os valores das cargas (kgf) obtidas para as penetrações (2,0 e 2,5 mm) ou obtidas a partir de tabelas do anexo da norma DNER-ME 254/94. No ensaio de penetração de mini-CBR não foi feita a medição da expansão dos corpos-de-prova, embora tenha sido observado, tanto nesse ensaio quanto nos outros, uma certa contração dos corpos-de-prova.

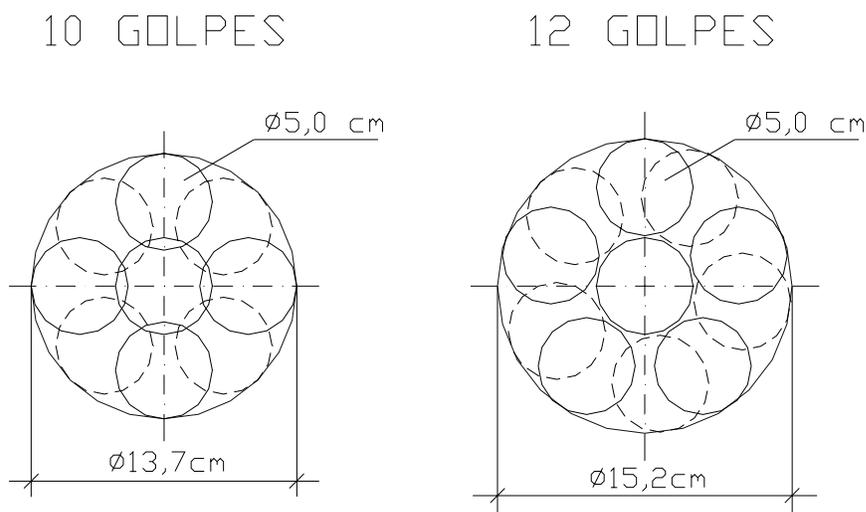


**FIGURA 16** – Prensa de penetração do mini-CBR.

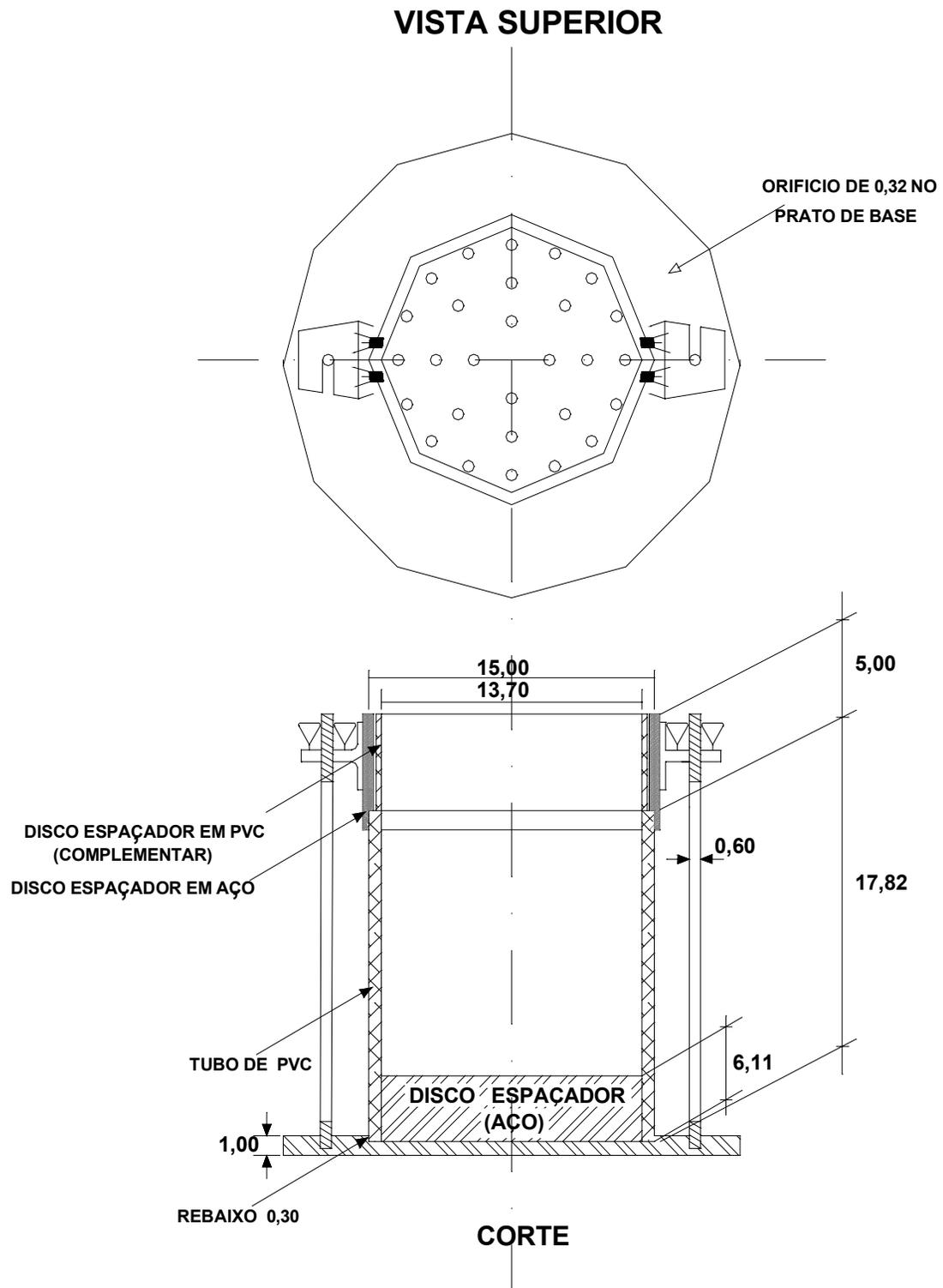
### **Índice de suporte CBR - Adaptado**

Em decorrência do grande número de corpos-de-prova utilizados, aliado ao alto custo dos moldes metálicos, bem como à corrosão provocada pelo contato do resíduo com as paredes do cilindro de aço, comprovada através de ensaios de corrosão, optou-se pela confecção de moldes em PVC rígido, diâmetro nominal externo de 150 mm, com espessura de parede de aproximadamente 10 mm; tais moldes cilíndricos, assim como o cilindro complementar (também de PVC), o disco espaçador de aço e a sobrecarga, foram usinados e adaptados às novas dimensões (Figuras 17, 18, 19, 20 e 21).

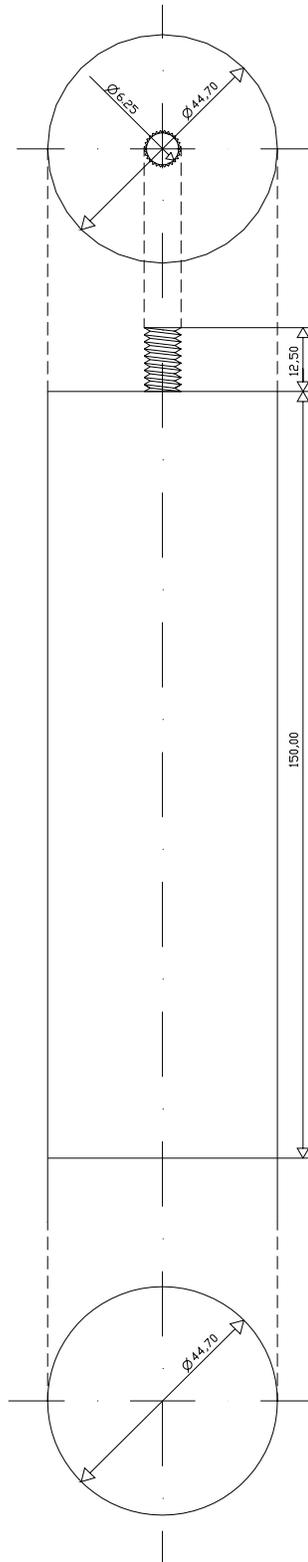
Em decorrência das mudanças efetuadas (redução do diâmetro interno do molde), o pistão e a sobrecarga também tiveram suas dimensões reduzidas, assim como as profundidades de penetração, mantendo-se a mesma proporção do CBR convencional; contudo, foram mantidas as tensões padrões de 70,31 e 105,45 kgf/cm<sup>2</sup>, tais quais as empregadas para o mini-CBR (NOGAMI, 1972). Os resultados estão, também, registrados no Quadro 9. Os corpos-de-prova foram curados por 1 (um) dia ao ar livre e à sombra, e o restante dos dias em câmara úmida, penetrados com sobrecarga aos 21, 60 e 120 dias, após prévia imersão em água por 96 h. Os corpos-de-prova foram moldados com os parâmetros de compactação obtidos do ensaio de Proctor normal.



**FIGURA 17** - Configuração do número de golpes.



**FIGURA 18** – Detalhe do molde CBR-adaptado (medidas em cm).



**FIGURA 19** - Detalhe do pistão-Adaptado (medidas em mm).

**QUADRO 9** - Parâmetros característicos do CBR e CBR-Adaptado.

Parâmetros		CBR (DNER-ME 049/94)	CBR (adaptado)
Molde	Diâmetro (mm)	152	137
	Altura (mm)	178,0	178,0
	Volume (cm <sup>3</sup> )	2068,62	1723,8
Energia	Normal (kg x cm/cm <sup>3</sup> )	6,00	6,00
Amostra	Massa (kg)	6,0	5,0
Compactação na energia normal	Soquete (kg)	4,50	4,50
	Altura de queda (mm)	457,0	457,0
	Número de golpes	12	10
	Número de camadas	5	5
Pistão de penetração	Diâmetro (mm)	49,6	44,1
Disco espaçador	Altura (mm)	64,0	61,1
	Diâmetro (mm)	152	137
Prensa	Capacidade (kN)	40,00	40,00
	Velocidade (mm/min)	1,27	1,27
Penetrações	(mm)	2,54	2,28
		5,08	4,57
Sobre carga	Peso (kg)	2,270	2,05
Tempo de imersão	(horas)	96	96

Obs: no caso em questão o pistão teve diâmetro de 42,3.

### **Correlação entre o CBR-Adaptado e CBR Convencional**

Com o objetivo de se determinar a correlação entre os índices CBR-Adaptado e CBR convencional, foram preparadas 12 amostras de solo de diferentes granulometrias. O ensaio constou da moldagem simultânea de dois corpos-de-prova confeccionados com a mesma amostra de solo, umidade e peso específico, submetidos à mesma energia normal de compactação. As amostras foram compactadas, curadas por 1 (um) dia em câmara úmida e, em seguida, imersas em água por mais 96 h; os corpos-de-prova foram, então, submetidos aos ensaios, cada um com os seus respectivos pistões e sobrecarga, e determinados os seus respectivos índices de CBR.



**FIGURA 20** – Molde CBR-Adaptado com colar.



**FIGURA 21** – CBR-Adaptado em operação.

### **3 . 2 . 9 . Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova de solo e solo-água-de-cola**

Os ensaios de resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo e de solo-água-de-cola, foram realizados de acordo com a norma NBR-12025, à semelhança do ensaio de corpos-de-prova de solo-cimento, e rompidos aos 14, 21, 90 e 180 dias.

A razão da utilização de cilindro de Proctor (10,00 cm de diâmetro por 12,73 cm de altura) foi a não disponibilidade de moldes de proporção 1:2 (diâmetro: altura). A resistência à compressão simples foi expressa em MPa.

### **3 . 2 . 10 . Ensaio de tração na compressão diametral**

Os ensaios de tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo e de solo-água-de-cola, foram realizados de acordo com a norma DNER-ME 181/94; a Figura 22 mostra o ensaio em andamento, sendo os corpos-de-prova rompidos aos 14, 21, 90 e 180 dias. A resistência à tração por compressão diametral, expressa em kPa, foi calculada pela fórmula:

$$\sigma = \frac{2.P}{\pi.D.L}$$

onde:

**P** - carga máxima obtida no ensaio (N);

$\sigma$  - resistência à tração por compressão diametral (kPa);

**D** - diâmetro do corpo-de-prova (m);

**L** - altura do corpo-de-prova (m).



**FIGURA 22** – Corpo-de-prova no ensaio de tração por compressão diametral.

### **3 . 2 . 11 . Determinação do módulo de resiliência**

O módulo de resiliência de solos, definido como a relação entre a tensão desvio, aplicada repetidamente em uma amostra de solo, e a correspondente deformação específica vertical, recuperável ou resiliente, foi determinado em corpos-de-prova compactados, com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, aos 21 dias de cura, de acordo com a norma DNER-ME 131/94.

Baseado em MONISMITH (1992), que afirmou que qualquer método de compactação que reproduza o peso específico aparente seco máximo desejado é considerado adequado para preparação de amostras em laboratório, os corpos-de-prova ensaiados foram compactados na energia equivalente à do Proctor normal, sendo os parâmetros de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo obtidos do mini-Proctor. O equipamento de moldagem dos corpos-de-prova pode ser visto na Figura 23.

A partir dos parâmetros de compactação, as amostras de solos foram peneiradas na peneira n<sup>o</sup> 10 (2,00 mm de abertura de malha) e feitas as determinações da umidade natural. Em seguida, as amostras de solo foram

pesadas, acondicionadas em sacos plásticos, adicionado o tratamento, e complementadas com água até o teor de umidade ótimo obtido do ensaio de compactação, de acordo com cada tratamento e para cada tipo de solo.



**FIGURA 23** – Equipamento de compactação utilizado na confecção de corpos-de-prova para o módulo de resiliência.

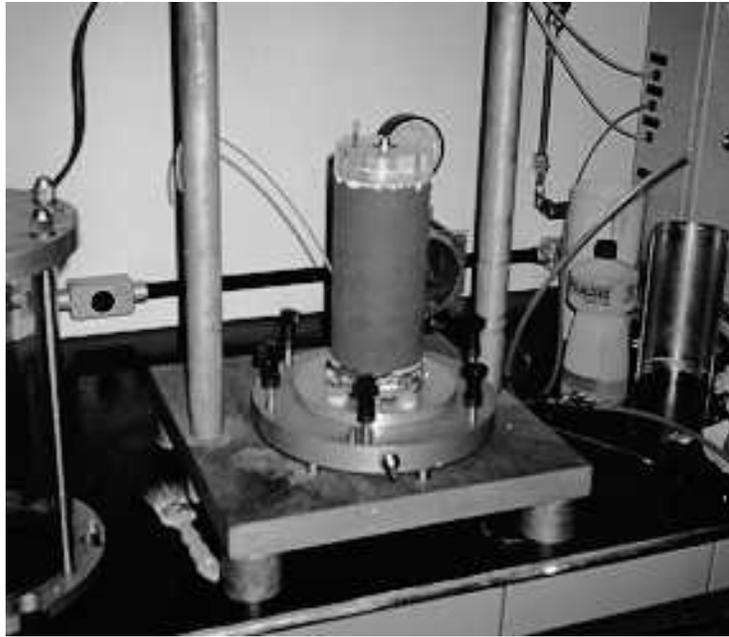
Feitas as misturas, o material era homogeneizado, etiquetado e acondicionado em sacos plásticos para evitar perda de umidade, mantendo-os em caixa de isopor durante 24 horas para a devida cura. A necessidade desse condicionamento (umedecimento prévio) é para que a mistura fique totalmente homogeneizada, a fim de que o líquido (água e resíduo) e o aditivo possam envolver totalmente as partículas de solo.

Os corpos-de-prova de solo-mistura foram moldados mediante compactação em três camadas, utilizando-se um dispositivo de medição de altura e um soquete de seção plena, sendo o diâmetro do molde igual ao do soquete, este solto em queda livre. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram extraídos do molde, envoltos por filme plástico, etiquetados e acondicionados em uma caixa de isopor até o dia do ensaio.

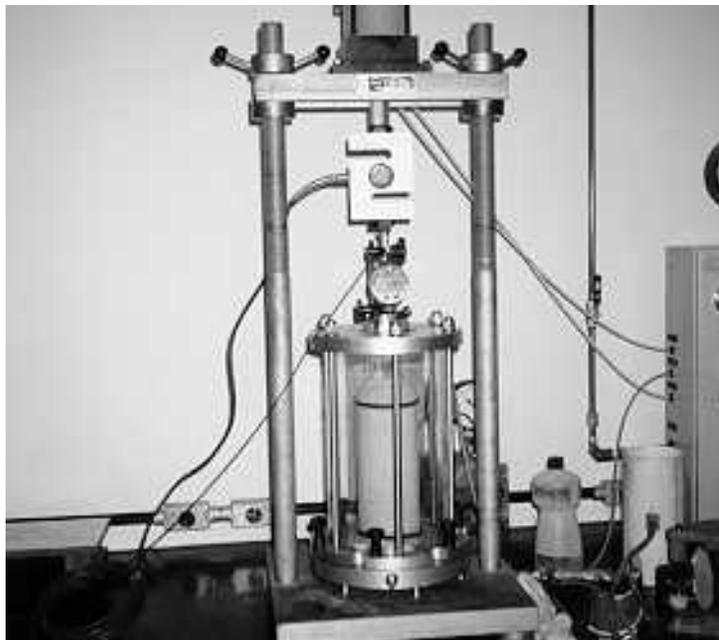
Passados os 21 dias de cura, os corpos-de-prova foram pesados e suas alturas medidas, para fins de determinação das deformações. Os corpos-de-prova foram capeados com pasta de gesso e água e colocados na base da célula triaxial; em seguida foi feito o capeamento do cabeçote, sendo o conjunto envolto com duas membranas de borracha e colocado na câmara triaxial. A verificação da existência de furos ou imperfeições da membrana e de vazamento de ar na câmara triaxial foram verificados por meio de um dispositivo de vácuo. As Figuras 24 e 25 mostram o equipamento utilizado.

As deformações do ensaio foram medidas com o auxílio de um relógio comparador digital instalado paralelamente na haste de transmissão de carga, que fazia a ligação do cabeçote à célula de carga por fora da câmara triaxial (Figura 26). Os valores medidos das deformações foram transmitidos ao sistema de aquisição de dados. As cargas repetidas que resultaram em tensões desvio foram medidas através de uma célula de carga, sendo os valores transmitidos ao sistema de aquisição de dados (AQDADOS) e gerenciados por um computador PC.

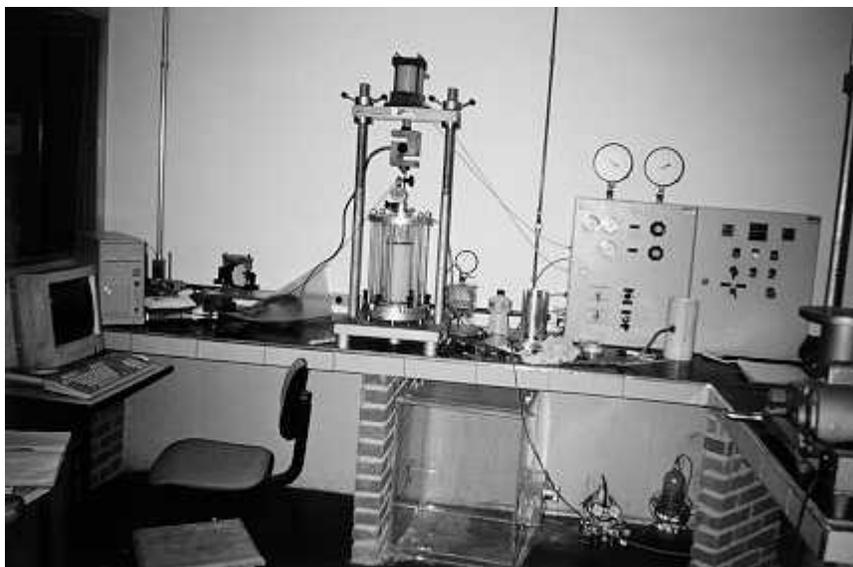
As tensões-desvio e tensões confinantes foram geradas através de um sistema pneumático. O painel de controle continha válvulas reguladoras de pressão, dispositivo de contagem de aplicação de carga, assim como temporizador de frequência (0,33 ciclos por segundo) e de duração de aplicação de carga (0,50 s).



**FIGURA 24** – Corpo-de-prova na base da célula triaxial.



**FIGURA 25** – Corpo-de-prova na célula triaxial.



**FIGURA 26** - Equipamento triaxial com caixa de controle das tensões, célula de carga, sistema de aquisição de dados e micro-computador.

Para eliminação das deformações permanentes, os corpos-de-prova foram submetidos a uma fase de condicionamento, diferenciada para cada tipo de solo (MEDINA e PREUSSLER, 1980). O condicionamento constou de 200 aplicações de carga sob tensão confinante pré-estabelecida, sem registro das deformações.

Para o solo arenoso, que é sensível a tensões confinantes, o condicionamento constou de 200 aplicações de uma carga sob diferentes tensões confinantes ( $\sigma_3$ ) e tensões-desvio ( $\sigma_d$ ) (Quadro 10).

Realizada a fase de condicionamento, iniciou-se o ensaio com 200 aplicações de carga com duração de 0,50 segundo e frequência de 0,33 ciclos por segundo. O registro das deformações resilientes foi feito tomando-se por base as 10 últimas aplicações de carga, cujos valores alimentaram o sistema de aquisição de dados, juntamente com a carga atuante e a tensão desvio, observando-se a configuração de tensões mostrada no Quadro 11.

**QUADRO 10** - Configuração de tensões para o condicionamento de corpos-de-prova de solo arenoso.

Tensão confinante - $\sigma_3$ (kPa)	Tensão desvio - $\sigma_d$ (kPa)
70	70 210
105	315

**QUADRO 11** - Configuração de tensões para registro das deformações resilientes para o solo arenoso.

Tensão de confinamento - $\sigma_3$ (kPa)	Tensão desvio - $\sigma_d$ (kPa)
21	70 100 150 200
50	70 100 150 200
70	70 100 150 200
100	70 100 150 200
150	70 100 150 200

Para o solo argiloso, que não é sensível a tensões confinantes, o condicionamento constou da aplicação de uma tensão confinante ( $\sigma_3$ ) de 21 kPa e 200 vezes uma tensão-desvio ( $\sigma_d$ ) de 70 kPa. Para a execução do ensaio, as 200

aplicações de carga das várias tensões-desvio e as deformações resilientes foram registradas tomando-se por base as 10 últimas aplicações de carga que eram tratadas no sistema de aquisição de dados, juntamente com a carga atuante, conforme a configuração de tensões mostrada no Quadro 12.

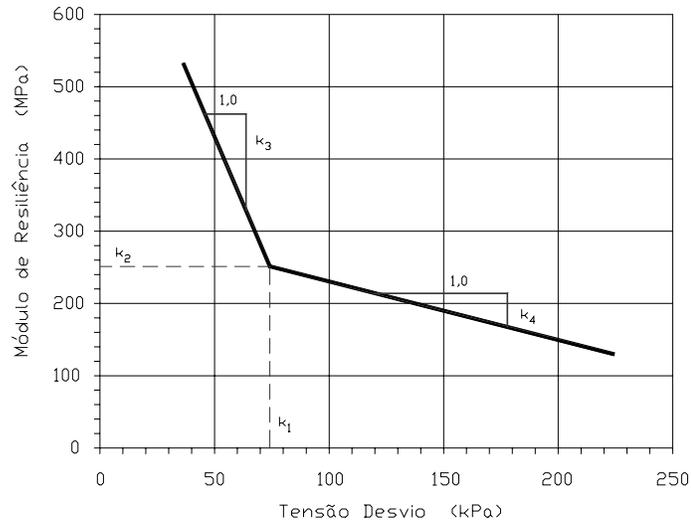
**QUADRO 12** - Configuração de tensões para registro das deformações resilientes para o solo argiloso.

Tensão de confinamento - $\sigma_3$ (kPa)	Tensão desvio - $\sigma_d$ (kPa)
21	30
	50
	70
	100
	150
	200

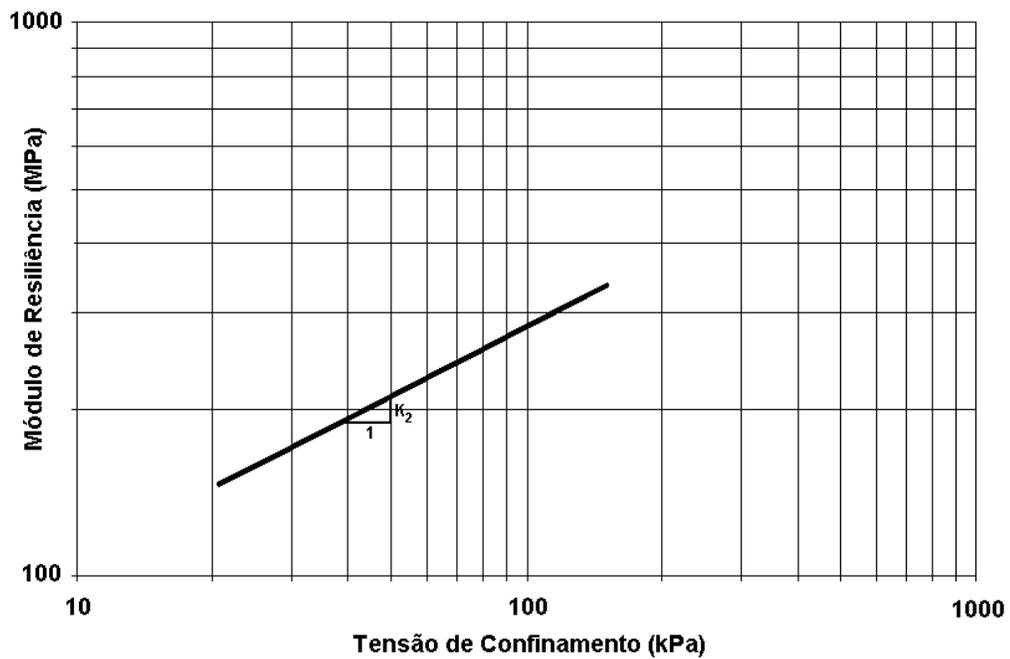
Com os resultados obtidos de tensões e deformações, foram calculados os valores dos módulos, representados em gráficos em escala aritmética  $M_R - \sigma_3$ , para o solo argiloso (Figura 27) e  $\log M_R - \log \sigma_3$ , para o solo arenoso (Figura 28).

### **3 . 2 . 11 . Ensaio de durabilidade por ciclos alternados de molhamento e secagem**

A durabilidade foi avaliada através da perda de resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova submetidos a 4 ciclos de molhamento e secagem e curados em câmara úmida. A avaliação da durabilidade de corpos-de-prova em laboratório foi feita baseando-se na metodologia proposta por MARCON (1981) e SILVA e CERATTI (1981), para misturas solo-cal-cinza volante.



**FIGURA 27** – Modelo do módulo de resiliência em função da tensão desvio para o solo argiloso.



**FIGURA 28** – Modelo do módulo de resiliência em função da tensão confinante para solos arenosos.

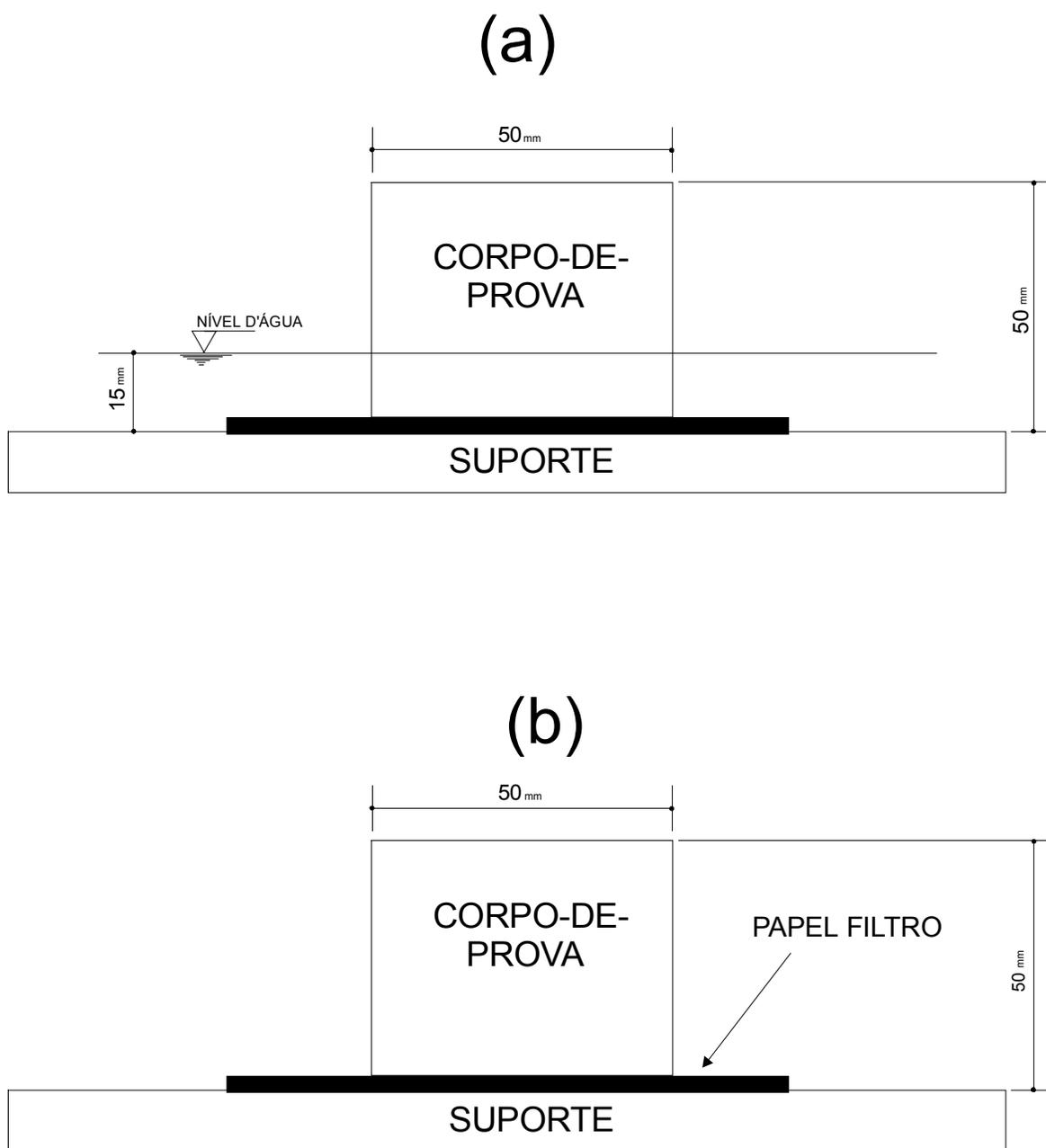
Para isto, seis corpos-de-prova de cada tratamento foram compactados na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo do ensaio de compactação mini-Proctor, sendo, em seguida, envoltos em filme plástico durante os 21 dias de cura em câmara úmida. Após o período de cura, dois corpos-de-prova de cada tratamento permaneceram na câmara úmida até o dia do rompimento à tração na compressão diametral; dos demais, um foi utilizado para a determinação da umidade durante os ciclos de molhamento e secagem; o quarto, foi submetido ao processo de molhamento e secagem e utilizado para as medições de expansão e contração axial; os dois restantes, foram submetidos ao ensaio de durabilidade sendo, ao final submetidos também ao ensaio de tração na compressão diametral.

Durante o processo de molhamento, os corpos-de-prova foram parcialmente imersos em uma lâmina de água de 15 mm de altura (Figura 29a), ficando o restante de sua massa exposto ao ar livre, durante 24 h. O molhamento se dava por ascensão capilar da água, enquanto que a secagem, por exposição ao ar, mediante evaporação da água e carbonatação da cal, durante 4 dias (Figura 29b).

Durante o processo de molhamento e secagem, as medições de expansão e contração axial dos corpos-de-prova, foram efetuadas com auxílio de um extensômetro (Figura 30), sendo os corpos-de-prova, em todas as fases do ensaio, pesados e medidos.

### **3 . 2 . 13 . Análise estatística**

A análise estatística foi realizada através de uma análise de variância, com delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial, e da aplicação do teste de Tukey para a comparação das médias, ao nível de 5% de probabilidade estatística.



**FIGURA 29** – Detalhe do corpo-de-prova no processo de molhamento (a) e secagem (b).



**FIGURA 30** – Extensômetro utilizado nas medições de expansão e contração axial.

## **4 . RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios referentes à caracterização ambiental do resíduo “água-de-cola”, culminando com sua classificação de acordo com a norma NBR – 10004. Em seguida, os resultados dos demais ensaios realizados estão apresentados em duas partes. Na primeira, intitulada Resultados Preliminares, estão os resultados dos ensaios inicialmente realizados visando a definição das dosagens e concentrações do resíduo “água-de-cola” que seriam utilizadas posteriormente nos ensaios definitivos, assim como o resultado do ensaio de caracterização físico-mecânica do solo arenoso-1, com e sem tratamento com “água-de-cola” e cal. Na segunda parte, intitulada Resultados Obtidos, estão os resultados dos ensaios propostos na metodologia, apresentados na mesma ordem, exceção feita para o ensaio de determinação do índice CBR.

### **4 . 1 . Ensaio de caracterização ambiental do resíduo.**

No Quadro 13 estão apresentadas as principais características físicas, químicas e biológicas do resíduo “água-de-cola”, podendo-se observar que este resíduo não contém substâncias alistadas como 1, 2, e 4, tal como proposta pela norma técnica NBR – 10004. A amostra foi também analisada quanto à periculosidade, seguindo o fluxograma da Figura 12, para os seguintes parâmetros: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Os resultados dos ensaios comparados com os valores relatados nos anexos I, II, III e IV, da NBR – 10004, indicaram que o resíduo “água-de-cola” é não inflamável, não corrosivo, não reativo, não tóxico e não patogênico.

**QUADRO 13** – Características principais do resíduo “água-de-cola”.

Determinações	Unidades	Valores*
pH	-	4,8
Resíduo total a 105 °C	%	0,47
Resíduo volátil	%	99,97
Resíduo fixo a 550 °C	%	0,03
DQO tal qual	mgO <sub>2</sub> /l	9993
DQO filtrada 0,45	mgO <sub>2</sub> /l	3567
DBO tal qual	mgO <sub>2</sub> /l	2843
Sulfato inorgânico	ppm	21
Sulfato orgânico	ppm	25
Carbono orgânico total	ppm	2311
NH <sub>3</sub>	ppm	2,5
Nitratos	ppm	2,77
Nitritos	ppm	0,53
Sódio	ppm	9,93
Carbonatos	ppm	14
Acetato de vinila	ppm	1190
Álcool alílico	ppm	ND
Ftalato de butila	ppm	38
Formol	ppm	ND
Cloretos	ppm	9

\* Média de três amostragem.

Seguindo o fluxograma, e examinando-se a listagem nº 7, da norma NBR – 10004, que estabelece as concentrações máximas do extrato obtido do lixiviado (NBR – 10005), verifica-se que nenhum dos componentes faz parte do processo produtivo, não sendo necessária a realização do ensaio de lixiviação. Da avaliação das características de periculosidade realizadas, conclui-se que o resíduo “água-de-cola” não é classificado como Classe I – perigoso.

Quanto ao teste de corrosão, observou-se que, mesmo sendo os valores obtidos inferiores aos estabelecidos no anexo III, o aço carbono SAE – 1020 mostrou-se incompatível com o meio analisado, apresentando corrosão severa,

principalmente no meio líquido, recomendado-se que o aço carbono não seja utilizado em contato com o efluente.

O ensaio de solubilização (NBR – 10006) define se o resíduo pode ser classificado como Classe II ou III. Consiste em colocar uma amostra de 250 g, base em peso seco, representativa do resíduo e coletada segundo a NBR – 1007, em um frasco de 1500 cm<sup>3</sup>, e a ela adicionar 1000 cm<sup>3</sup> de água desionizada ou destilada, agitando a amostra em baixa velocidade por 5 minutos; em seguida, o frasco é tampado e deixado a descansar por 7 dias. A solução é filtrada em membrana de 0,45 µm, para análise química, sendo os valores comparados com os do anexo 8 da NBR – 10004. No caso específico do resíduo ser líquido, a amostra representou o solubilizado, sendo as análises feitas separadamente para metais (Quadro 14) e ácido (Quadro 15).

**QUADRO 14** – Comparação entre os valores dos metais encontrados no solubilizado com os valores da NBR – 10004.

Elementos	NBR - 10004	Água do processo	Solubilizado
Cromo (ppm)	0,05	ND	ND
Alumínio (ppm)	0,2	ND	0,19
Cobre (ppm)	1,0	ND	ND
Ferro (ppm)	0,3	0,68	0,71
Zinco (ppm)	5,0	0,04	0,18
Chumbo (ppm)	0,05	ND	ND
Prata (ppm)	0,05	ND	ND

Observa-se que o teor de ferro, na água do processo, é superior ao estabelecido na listagem, sendo característica da água da região, não sendo considerada como elemento de comparação.

**QUADRO 15** – Comparações entre os valores dos ácidos encontrados no solubilizado com os valores da NBR – 10004.

Compostos	Limites NBR - 10004	Amostra
Sulfatos (ppm)	400	< 80
Nitrato (ppm)	10	< 3
Sódio (ppm)	200	12
Cobre (ppm)	1	<0,02
Cloreto (ppm)	250	10

Comparados os dados da análise com os da listagem nº 8, conclui-se que o resíduo “água-de-cola” é considerado Classe III – inerte, de acordo com a norma NBR – 10004, podendo ser posto em aterro comum.

Sendo o resíduo “água-de-cola” classificado como inerte, a sua aplicação na superfície das estradas de terra, como agente deliqüescente (retentor de pó), e com a devida autorização do órgão fiscalizador de ambiente, tem sido aceitável. Ocorre que, sendo o resíduo concentrado a 0,5% de sólidos, 99,5% é água; com a evaporação desta água, os 0,5% sólidos, através de polimerização, vão formando um filme; à medida que novas camadas são lançadas, nova películas vão se formando, resolvendo, satisfatoriamente, o problema de desprendimento de poeira.

Visitas “in loco” permitiram observar que as películas (filmes) formadas, depois de secas, apresentam macro-fissuras em toda a extensão, similares à pele de jacaré. Este problema é minimizado quando novas camadas de resíduo “água-de-cola” são aplicadas sobre as anteriores.

No caso em questão, o resíduo é aplicado superficialmente nas pistas de estradas não revestidas, ocorrendo evaporação da água; contudo, se ele for incorporado às bases, sub-bases ou sub-leitos, a umidade de equilíbrio permanece muito próximo da obtida no ensaio de compactação (VILLIBOR, 1981;

MEDINA, 1997; LUCENA *et al.*, 1994; e MOTA *et al.*, 1986), não ocorrendo evaporação e, conseqüentemente, não havendo total polimerização.

#### 4 . 2 . Resultados Preliminares

As características físicas do solo arenoso-1, utilizado unicamente nos ensaios preliminares de dosagem, estão registradas no Quadro 16.

**QUADRO 16** - Características físicas do solo arenoso-1.

Parâmetros		Solo Arenoso
Composição textural (% em peso)	Areia grossa (0,42-2,00 mm)	3
	Areia fina (0,05-0,42 mm)	77
	Silte (0,005-0,05 mm)	12
	Argila (< 0,005 mm)	8
Limites de consistência (%)	Limite de liquidez	NP
	Limite de plasticidade	NP
	Índice de plasticidade	NP
Classificação	AASHTO	A <sub>2-4</sub>
	Bureau of Public Roads	Arenoso
Peso específico dos sólidos (kN/m <sup>3</sup> )		26,62

##### 4 . 2 . 1 . Ensaio de compactação

Os resultados da determinação do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima do ensaio de compactação para os solos argiloso e arenoso-1, com diferentes concentrações de PVA, estão mostrados nos Quadros 17 e 18, respectivamente, enquanto que, para as misturas com 3% de cal, nos Quadros 19 e 20, respectivamente.

**QUADRO 17** - Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo argiloso sob tratamento com água-de-cola com diferentes concentrações de PVA.

Parâmetros	Solo tratado com 15% de água-de-cola concentrada a				
	0%	1%	5%	10%	15%
$\gamma_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,38	15,61	15,56	15,49	15,74
$h_{ot}$ (%)	24,91	23,19	23,83	23,91	23,91

**QUADRO 18** - Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal sob tratamento com água-de-cola com diferentes concentrações de PVA.

Parâmetros	Solo tratado com 3% de cal e 15% de água-de-cola concentrada a				
	0%	1%	5%	10%	15%
$\gamma_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,59	-	15,52	15,67	15,39
$h_{ot}$ (%)	23,65	-	23,54	24,25	23,75

**QUADRO 19** - Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo arenoso-1 sob tratamento com água-de-cola com diferentes concentrações de PVA.

Parâmetros	Solo tratado com 8% de água-de-cola concentrada a				
	0%	1%	5%	10%	15%
$\gamma_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,37	19,36	19,12	19,33	19,06
$h_{ot}$ (%)	9,56	10,20	9,96	8,80	10,28

**QUADRO 20** - Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo arenoso-1 sob tratamento com 3% de cal e água-de-cola com diferentes concentrações de PVA.

Parâmetros	Solo tratado com 3% de cal e 8% de água-de-cola concentrada a				
	0%	1%	5%	10%	15%
$\gamma_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,10	18,74	19,01	19,01	18,85
$h_{ot}$ (%)	10,95	10,90	10,64	11,12	11,05

Os resultados das misturas (tratamentos) do solo arenoso-1 com 5% de cal, assim como os valores do peso específico aparente seco máximo e umidade ótima correspondente do solo tratado com diferentes concentrações de “água-de-cola”, estão mostrados no Quadro 21.

**QUADRO 21** - Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo arenoso-1 e solo arenoso adicionado de cal sob tratamento com água-de-cola com diferentes concentrações de PVA.

Parâmetros	Solo tratado com 5% de cal e 8% de água-de-cola concentrada a				
	0%	1%	5%	10%	15%
$\gamma_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,41	19,20	18,99	19,02	18,84
$h_{ot}$ (%)	11,09	11,12	10,49	10,82	10,90

Os dados do Quadro 17 mostram que, independentemente da concentração utilizada, não houve grandes variações no peso específico aparente seco máximo

(variação de  $0,36 \text{ kN/m}^3$ ) e na umidade ótima (1,74%), indicando que não houve efeito da concentração nos parâmetros de compactação do solo argiloso. No caso do solo tratado com 3% de cal e 15% de “água-de-cola” (Quadro 18), as variações foram de  $0,11 \text{ kN/m}^3$  para o peso específico e de 0,71% para a umidade ótima; tais resultados indicam, também, que a dose de 15% de “água-de-cola” nas diversas concentrações não provocou efeito algum sobre os parâmetros de compactação do solo-cal.

No caso do solo arenoso (Quadro 19), as variações foram de menos de  $0,50 \text{ kN/m}^3$  para o peso específico e menos de 1% para a umidade ótima do ensaio de compactação, a mesma tendência sendo observada para o caso do solo arenoso tratado com 3% de cal e 8% de “água-de-cola” concentrada em diversas concentrações (Quadro 20). Com o acréscimo do teor da cal para 5% e empregando-se as mesmas doses e concentrações de “água-de-cola”, as variações foram maiores, podendo ser creditadas ao efeito da cal (Quadro 21).

Os resultados dos ensaios de compactação das misturas (tratamentos) de solo arenoso-1, tratados ou não com 3% de cal e com 8% de “água-de-cola” com diferentes concentrações de PVA, estão mostrados no Quadro 22.

Em se tratando de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do ensaio de compactação, a análise de variância indicou que, com a aplicação de 8% de “água-de-cola”, independentemente da concentração utilizada, os resultados obtidos para o solo arenoso-1 não alcançaram significância estatística ao nível de 5% de probabilidade; no entanto, o mesmo não ocorreu com a adição de 3% de cal.

O teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, aplicado aos valores de peso específico aparente seco máximo (Quadro 22), indicou que a aplicação de 3% de cal ao solo promoveu uma redução dos seus valores independentemente da concentração de “água-de-cola” utilizada. Por outro lado, a adição de cal ao

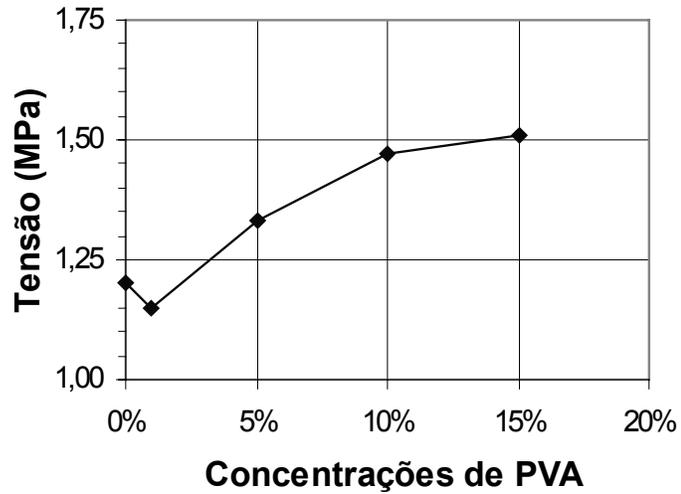
solo aumentou os valores da umidade ótima em níveis estatisticamente significativos, confirmando as conclusões de SVENSON (1981), SHERWOOD (1993) e ALCANTARA *et al.* (1995).

**QUADRO 22** - Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo arenoso-1 e do solo tratado com 3% de cal, ambos sob tratamento com 8% de “água-de-cola” com diferentes concentrações de PVA.

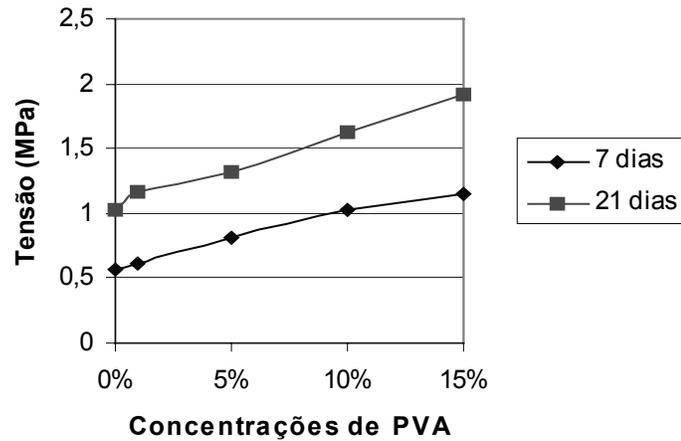
Parâmetros		solo tratado com 8% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 8% de água-de-cola concentrada a		
		0%	5%	10%	0%	5%	10%
$\gamma_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	A	19,88	19,36	19,60	19,23	19,23	19,14
	B	19,70	19,74	19,62	19,59	19,21	19,08
	C	19,72	19,86	19,55	19,36	19,12	19,21
	X	19,77	19,65	19,59	19,39	19,19	19,14
$h_{ot}$ (%)	A	9,54	9,94	9,79	10,87	10,83	11,07
	B	9,79	9,70	9,73	10,56	10,87	10,84
	C	9,70	9,96	9,96	10,85	10,69	10,73
	X	9,68	9,87	9,83	10,76	10,85	10,54

#### 4 . 2 . 2 . Ensaio de compressão simples

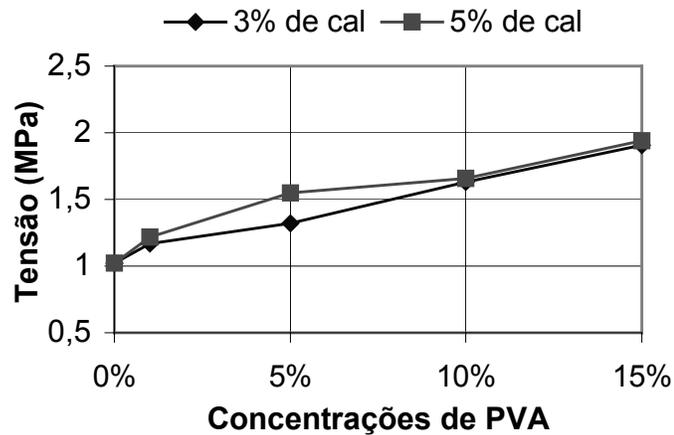
Os valores da resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo arenoso-1 tratado com “água-de-cola” em diferentes concentrações, estão mostrados na Figura 31, e, para a mistura com 3% de cal, após 7 e 21 dias de cura, na Figura 32; para as misturas com 3 e 5% de cal, na Figura 33. Os valores de resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo argiloso tratado com diferentes concentrações de “água-de-cola” e 3% de cal, estão mostrados na Figura 34.



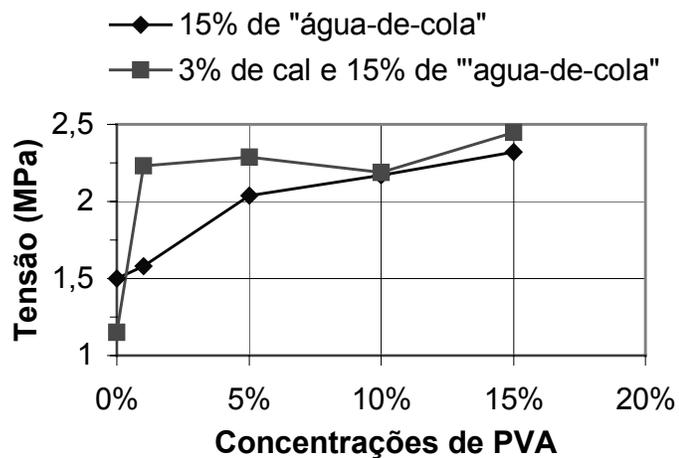
**FIGURA 31** - Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo arenoso-1 tratado com 8% de água-de-cola com diferentes concentrações de PVA (médias de 2 repetições).



**FIGURA 32** - Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo arenoso-1 e solo arenoso-1 adicionado de 3% cal, e tratados com 8% de “água-de-cola” em diferentes concentrações de PVA (médias de 2 repetições).



**FIGURA 33** - Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo arenoso-1 e solo arenoso-1 adicionado de 3% e 5% de cal, tratados com 8% de “água-de-cola” em diferentes concentrações de PVA (médias de 2 repetições).



**FIGURA 34** - Resistência à compressão simples aos 7 dias de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de 3% cal, e tratados com 15% de “água-de-cola” em diferentes concentrações de PVA (médias de 2 repetições).

A partir do conhecimento dos parâmetros de compactação foram moldados os corpos-de-prova (Proctor) de solo arenoso-1 com 8% de “água-de-cola” nas diversas concentrações (Figura 31), observando-se um pequeno decréscimo da tensão para a concentração 0,5% de “água-de-cola”, para o resíduo “in natura”, e um crescente aumento da tensão com o aumento da concentração de “água-de-cola” para corpos-de-prova rompidos aos 7 dias, curados ao ar livre e à sombra. Na Figura 32, com a adição de 3% de cal ao solo, e para corpos-de-prova curados aos 21 dias ao ar livre e à sombra, observa-se, também, um aumento da tensão, proporcionalmente à concentração de “água-de-cola”.

Ainda com relação ao solo arenoso-1, testou-se, também, a dose de 5% de cal, para as mesmas concentrações de “água-de-cola”. Os resultados (Figura 33) mostraram que as doses de 3 e 5% de cal apresentaram valores semelhantes de tensões e superiores à testemunha, para o mesmo tipo de cura, ao ar livre e à sombra. No caso específico do solo argiloso, tratado com a dose 15% de “água-de-cola” nas diversas concentrações (Figura 34), não houve ganhos apreciáveis de resistência à compressão simples com a adição de 3% de cal em relação à testemunha, para os corpos-de-prova curados ao ar livre e à sombra, sendo todos os valores superiores à testemunha.

No caso do solo arenoso-1, adicionado de cal ou não de 3 ou 5% de cal e tratado com 8% de “água-de-cola”, independentemente do tempo de cura (7 e 21 dias), a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova aumentou com o acréscimo da concentração de PVA. No caso solo argiloso, adicionado ou não de 3% de cal e tratado com 15% de “água-de-cola”, o mesmo efeito foi observado. Tal acréscimo no valor da resistência pode ser atribuído à polimerização do PVA presente no resíduo “água-de-cola”, em quantidade tanto maior quanto maior for a concentração, fenômeno este decorrente da evaporação e secagem da água.

O objetivo da realização destes ensaios preliminares de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos, foi unicamente definir as melhores doses e

concentrações de “água-de-cola” e de cal que seriam utilizadas nos ensaios definitivos; os resultados indicaram, como melhores concentrações, as de 5 e 10%, uma vez que a concentração 0,5% de “água-de-cola” no resíduo “in natura” apresentou valores de resistência à compressão simples não significativos, chegando, em alguns casos, a valores inferiores ao da testemunha, independentemente do solo utilizado. Da mesma forma, escolheu-se a dose 3% de cal para ser adicionada aos solos com a finalidade de melhorar suas características físicas e mecânicas, sem caracterizá-los como solo-cal. A concentração 15% de “água-de-cola” foi descartada por não apresentar ganhos de resistência significativos, bem como por não constituir objetivo deste trabalho usar grandes concentrações do produto PVA.

Os valores de resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo arenoso-1 e de solo-cal, rompidos aos 21 dias de idade, estão mostrados no Quadro 23.

**QUADRO 23** - Resistência à compressão simples, aos 21 dias, de corpos-de-prova de solo arenoso-1 e de solo arenoso-1 adicionado de cal sob tratamento com água-de-cola em diferentes concentrações de PVA.

Parâmetro		solo tratado com 15% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 15% de água-de-cola concentrada a		
		0% (T7)	5% (T8)	10% (T9)	0% (T10)	5% (T11)	10% (T12)
Resistência à compressão (MPa)	A	1,27	1,15	1,18	0,80	0,86	0,99
	B	1,18	1,24	1,11	0,64	1,08	0,92
	C	1,37	1,18	1,15	0,57	0,80	0,96
	X	1,27 a	1,19 a	1,15 a	0,67 b	0,91 a	0,96 a

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Após realizados os ensaios de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos na fase preliminar, e definidas as dosagens, partiu-se para a realização

dos mesmos de forma definitiva, agora envolvendo os tratamentos e repetições, conforme a metodologia. Com relação ao solo arenoso-1 (Quadro 23), a análise de variância aplicada aos valores de resistência à compressão simples mostrou que a dose de 8% de “água-de-cola”, concentrada a 5 e 10%, aplicada ao solo arenoso e ao solo-cal, não alcançou significância estatística, ao nível de 5% de probabilidade; por outro lado, a adição de 3% de cal aos solos provocou alterações estatisticamente significativas, quer para os tratamentos como para suas interações.

O teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade estatística revelou que os melhores resultados de resistência à compressão simples, para corpos-de-prova moldados com 3% de cal e 8% de “água-de-cola” concentrada, foram alcançados para concentrações de 5 e 10% de “água-de-cola” (T11 e T12), cujos valores foram estatisticamente iguais entre si, e ambos superiores a (T4). Em todos os casos a adição de 3% de cal ao solo, independentemente da concentração utilizada, reduziu os valores de resistência à compressão simples em relação à testemunha.

#### **4 . 2 . 3 . Índice de Suporte Califórnia**

Os resultados da determinação do índice de suporte Califórnia de corpos-de-prova de solo argiloso sob tratamento com “água-de-cola” em diferentes concentrações, e de solo argiloso adicionado de cal e tratados com “água-de-cola”, sem imersão, curados em câmara úmida, estão mostrados no Quadro 24; no Quadro 25, estão registrados os resultados obtidos para corpos-de-prova curados durante 7 dias ao ar livre e à sombra, seguidos de 14 dias em câmara úmida; no Quadro 26, os resultados dos corpos-de-prova curados durante 17 dias, ao ar livre e à sombra, seguidos de 4 dias em imersão; no Quadro 27, os resultados obtidos para o solo arenoso-1 sob tratamento com água-de-cola em diferentes concentrações e para o solo arenoso-1 adicionado de cal, sem imersão, aos 21 dias de idade, e cura em câmara úmida.

Pelo exame do Quadro 24, pode-se observar que os corpos-de-prova tratados com 15% de “água-de-cola” apresentaram valores de CBR inferiores aos da testemunha, evidenciando assim uma pequena perda de suporte com a adição do resíduo, mesmo que esta perda seja conseqüência do próprio ensaio; para o caso do solo com adição de 3% de cal, observou-se que houve um ganho significativo de resistência, o contrário ocorrendo para os corpos-de-prova de solo-cal confeccionados com 15% de “água-de-cola” concentrada a 5 e 10 %, ainda que estes valores sejam superiores à testemunha. Convém anotar que, neste caso, os corpos-de-prova não foram submetidos à imersão em água, contrariamente ao que dispõe a norma.

**QUADRO 24** - Índice de Suporte Califórnia (CBR) do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal de cal, sob tratamento com “água-de-cola” em diferentes concentrações, sem imersão<sup>(\*)</sup>.

Parâmetro	solo tratado com 15% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 15% de água-de-cola concentrada a		
	0% (T1)	5% (T2)	10% (T3)	0% (T4)	5% (T5)	10% (T6)
CBR (%)	26,00	25,60	25,00	42,70	35,00	29,00

\* 21 dias cura em câmara úmida.

**QUADRO 25** - Índice de Suporte Califórnia (CBR) do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações, sem imersão<sup>(\*)</sup>.

Parâmetro	Solo tratado com 15% de água-de-cola concentrada a			Solo-cal tratado com 15% de água-de-cola concentrada a		
	0% (T1)	5% (T2)	10% (T3)	0% (T4)	5% (T5)	10% (T6)
CBR (%)	-	-	-	74,00	85,00	101,00

\* 7 dias de cura ao ar livre e à sombra e 14 dias em câmara úmida.

**QUADRO 26** - Índice de Suporte Califórnia (CBR) do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal sob tratamento com “água-de-cola” com diferentes concentrações, com imersão<sup>(\*)</sup>.

Parâmetro	Solo tratado com 15% de água-de-cola concentrada a			Solo-cal tratado com 15% de água-de-cola concentrada a		
	0% (T1)	5% (T2)	10% (T3)	0% (T4)	5% (T5)	10% (T6)
CBR (%)	-	-	-	17,10	17,60	9,70

\* 17 dias de cura ao ar livre e à sombra e 4 dias em imersão.

**QUADRO 27** - Índice de Suporte Califórnia (CBR) do solo arenoso-1 e do solo arenoso-1 adicionado de cal sob tratamento em água-de-cola com diferentes concentrações, sem imersão<sup>(\*)</sup>.

Parâmetro	Solo tratado com 8% de água-de-cola concentrada a			Solo-cal tratado com 8% de água-de-cola concentrada a		
	0% (T7)	5% (T8)	10% (T9)	0% (T10)	5% (T11)	10% (T12)
CBR (%)	102,4	128,0	112,0	113,0	108,0	80,0

\* 21 dias cura em câmara úmida.

Os valores de CBR mostrados no Quadro 25, para corpos-de-prova ensaiados sem imersão, são praticamente o dobro daqueles obtidos para corpos-de-prova curados em câmara úmida. Tal resultado foi contrário ao esperado, pois supunha-se que o valor de CBR fosse reduzido pela exposição dos corpos-de-prova durante 7 dias ao ar livre e à sombra, período esse suficiente para ocasionar grande perda de umidade nos corpos-de-prova tratados com cal; no caso de corpos-de-prova de solo-cal tratados com 15% de “água-de-cola” concentrada a 5 e 10%, observou-se um ganho significativo de capacidade de suporte, mesmo que tais elementos não tenham sido submetidos à imersão. Ainda no caso do solo

argiloso, agora submetido a 96 h de imersão (Quadro 26), os valores de capacidade de suporte caíram bruscamente, evidenciando que as ligações poliméricas do PVA presente no resíduo “água-de-cola” se desfizeram durante a imersão.

Com respeito ao solo arenoso-1 e solo arenoso-1 adicionado de cal (Quadro 27), os corpos-de-prova tratados com 8% de “água-de-cola” concentrada a 5 e 10%, curados durante 21 dias em câmara úmida, apresentaram valores de CBR superiores aos da testemunha. A maioria dos valores foi superior a 100%, exceção feita ao tratamento solo-cal com a concentração de 10% de “água-de-cola”, muito embora este valor seja, também, muito elevado; esses resultados referem-se a corpos-de-prova não imerso em água.

Um dos problemas observados durante a realização dos ensaios de CBR, foi que, devido à elevada acidez do resíduo ( $\text{pH} = 4,8$ ), houve corrosão das paredes do cilindro, dessa forma inviabilizando o uso de moldes de aço; a partir desta constatação, foram confeccionados moldes de PVC. Com respeito aos valores obtidos de CBR, independentemente do tipo de solo utilizado, observou-se uma dependência deles em relação ao fator cura e imersão ou não em água.

O solo arenoso-1, utilizado nos ensaios preliminares, foi coletado superficialmente em uma jazida, caracterizando-se por apresentar pequeno teor de finos (20%), dos quais apenas 8% era constituído de argila. Este solo foi descartado e escolhida uma nova jazida, ficando, a partir destes ensaios preliminares, o novo solo chamado unicamente de arenoso.

## 4.3. Resultados Definitivos

### 4.3.1. Limites de consistência

Os resultados obtidos a partir da determinação dos limites de consistência do solo argiloso estão mostrados no Quadro 28.

Com relação ao limite de liquidez (LL) do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal, a análise de variância mostrou não haver significância estatística, ao nível de 5% de probabilidade, para o tratamento com 15% de “água-de-cola”, independentemente da concentração utilizada, bem como para sua interação; a aplicação da dose 3% de cal ao solo, por outro lado, permitiu alcançar um certo grau de significância estatística.

**QUADRO 28** - Limites de consistência do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal sob tratamento com água-de-cola com diferentes concentrações de PVA.

Parâmetros		solo tratado com 15% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 15% de água-de-cola concentrada a		
		0% (T1)	5% (T2)	10% (T3)	0% (T4)	5% (T5)	10% (T6)
Limite de liquidez (%)	A	37,84	36,89	39,28	35,90	36,90	36,79
	B	39,27	38,46	38,37	37,66	36,43	36,10
	C	37,75	38,42	39,05	34,99	36,87	35,51
	X	38,29	37,92	38,90	36,18	36,73	36,13
Limite de plasticidade (%)	A	31,75	30,69	30,57	29,98	28,02	30,45
	B	28,37	29,67	31,52	30,34	27,54	30,12
	C	27,90	28,44	32,10	30,42	29,15	29,98
	X	29,34	29,90	31,39	30,25	28,23	30,18
Índice de plasticidade (%)	A	6,09	6,20	8,71	5,92	8,88	6,34
	B	10,90	8,79	6,85	7,32	8,89	5,98
	C	9,85	9,98	6,95	4,57	7,72	5,53
	X	8,95	8,32	7,51	5,93	8,50	5,95

O teste de Tukey, aplicado às médias de tratamento, mostrou que a aplicação de 3% de cal ao solo argiloso reduziu significativamente, ao nível de 5% de probabilidade estatística, os valores do limite de liquidez, independentemente da concentração de “água-de-cola” utilizada. Da mesma forma, a aplicação de 3% de cal ao solo natural promoveu uma redução significativa nos valores do limite de liquidez, efeito este alcançado também pela aplicação dos tratamentos com 15% de “água-de-cola”, independentemente da concentração utilizada.

No caso do limite de plasticidade do solo argiloso, a análise de variância revelou significância estatística, ao nível 5% de probabilidade, para o tratamento com “água-de-cola” concentrada, mas não para a adição de 3% da cal, bem como para sua interação, comprovando que a adição de 3% de cal ao solo argiloso não alterou significativamente os valores do seu limite de plasticidade.

O tratamento com “água-de-cola” concentrada a 10%, por sua vez, fez aumentar os valores do limite de plasticidade, em relação à testemunha, enquanto que a concentração de 5% reduziu os seus valores. No caso específico do solo sem adição de cal, a testemunha (T1) e o tratamento com a concentração de 5% (T2) foram estatisticamente semelhantes quanto aos seus efeitos sobre os valores do limite de plasticidade, enquanto que a dose com concentração de 10% (T3) promoveu uma elevação dos seus valores, em relação à testemunha.

Para o solo com adição de 3% de cal e para a dose 15% de “água-de-cola” concentrada, os maiores valores de limite de plasticidade foram obtidos para os tratamentos T4 e T6, ou seja, solo com cal e solo com adição de “água-de-cola” concentrada a 10%, respectivamente, estatisticamente iguais entre si.

Com relação ao índice de plasticidade, a análise de variância, ao nível de 5% de probabilidade, mostrou que, para os tratamentos aplicados aos solos argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratados com 15% de “água-de-cola”

concentrada, assim como para suas interações, os valores não alcançaram significância estatística.

Analisados conjuntamente, verifica-se que, para o solo argiloso tratado com 15% de “água-de-cola”, a aplicação dos tratamentos não alterou significativamente os valores do limite de liquidez e do índice de plasticidade, a mesmo não ocorrendo com o limite de plasticidade que acusou um aumento para a concentração de 10% de “água-de-cola”.

No caso específico do solo argiloso com cal, o tratamento com 3% de cal alterou o limite de liquidez, provocando uma redução no seu valor, em relação ao solo natural. Este efeito foi constatado, também, por vários autores, tais como LIMA *et al.* (1993), SVENSON (1981) e ALCÂNTARA *et al.* (1995). No entanto, segundo NÓBREGA (1988), dependendo da fração argila pode haver acréscimo ou redução nos valores do limite de liquidez do solo. Por sua vez, CARVALHO (1981) constatou que não há correlação entre os índices de plasticidade de solos tratados ou não com cal.

Essas discrepâncias, em relação aos limites de consistência, principalmente se relacionadas a solos tropicais, acarretam dificuldades ao se pretender estabelecer parâmetros de estabilização de solos baseados nesses índices.

#### **4 . 3 . 2 . Parâmetros de Compactação normal de Proctor**

Os valores do peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do solo argiloso estão mostrados no Quadro 29, enquanto que, para o solo arenoso, estão mostrados no Quadro 30.

O teste de Tukey, aplicado às médias de tratamento, mostrou que a adição de 3% de cal ao solo arenoso reduziu o valor do peso específico aparente seco máximo, independentemente da concentração de "água-de-cola" utilizada.

**QUADRO 29** - Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal sob tratamento com água-de-cola em diferentes concentrações de PVA.

Parâmetros		solo tratado com 15% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 15% de água-de-cola concentrada a		
		0% (T1)	5% (T2)	10% (T3)	0% (T4)	5% (T5)	10% (T6)
$\gamma_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	A	15,47	15,34	15,33	15,55	15,43	15,61
	B	15,49	15,43	15,49	15,63	15,63	15,68
	C	15,46	15,58	15,53	15,49	15,16	15,61
	X	15,47	15,45	15,45	15,57	15,41	15,63
$h_{ot}$ (%)	A	24,51	24,41	24,26	23,74	24,36	23,35
	B	24,39	24,11	24,23	23,18	24,43	23,37
	C	24,15	23,61	23,98	23,73	24,38	22,84
	X	24,35	24,04	24,16	23,55	24,39	23,19

**QUADRO 30** - Peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{max}$ ) e umidade ótima (%) do ensaio de compactação do solo arenoso e do solo arenoso adicionado de cal sob tratamento com água-de-cola com diferentes concentrações de PVA.

Parâmetros		solo tratado com 8% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 8% de água-de-cola concentrada a		
		0% (T7)	5% (T8)	10% (T9)	0% (T10)	5% (T11)	10% (T12)
$\gamma_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	A	19,62	19,82	19,68	19,12	18,98	18,83
	B	20,07	19,82	19,73	19,08	19,28	19,93
	C	19,89	19,88	19,75	18,99	19,01	18,89
	X	19,86	19,84	19,72	19,07	19,09	19,22
$h_{ot}$ (%)	A	9,81	10,56	10,47	11,65	11,43	11,68
	B	9,70	10,16	9,93	11,52	11,58	11,78
	C	9,66	9,97	9,94	11,37	11,37	12,09
	X	9,72	10,23	10,11	11,51	11,46	11,85

No caso específico do solo argiloso, nenhuma diferença significativa foi constatada nos valores do peso específico aparente seco máximo, quer relacionada ao tratamento do solo com diferentes concentrações de “água-de-cola”, quer relacionada com a adição de cal.

Com relação à umidade ótima de compactação, o teste de Tukey mostrou que, de um modo geral, a adição de 3% de cal aos solos estudados, aumentou o teor de umidade ótima, para qualquer concentração de “água-de-cola” utilizada.

Considerados os solos separadamente, pode-se observar que o efeito da adição de 3% de cal foi diverso, aumentando o teor de umidade ótima no solo arenoso, em todos os casos, e diminuindo-o no solo argiloso, para as concentrações de 0% e 10% de “água-de-cola”; este efeito não foi significativo para a concentração de 5% no solo argiloso.

Aplicado ao fator concentração de “água-de-cola”, o teste de Tukey mostrou que nenhum efeito teve as concentrações de 0%, 5% e 10% sobre a umidade ótima do solo argiloso (sem adição de cal) e solo arenoso (com adição de cal).

Inversamente ao que ocorreu com o peso específico aparente seco máximo, os teores de umidade ótima, em valores absolutos, foram sempre maiores para o solo argiloso do que para o solo arenoso, em todos os casos.

#### **4 . 3 . 3 . Parâmetros de Compactação mini-Proctor**

Tendo em vista as diferenças verificadas nos valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do ensaio de compactação normal de Proctor, por ocasião da moldagem de corpos-de-prova para o ensaio de resiliência, foram realizados ensaios de compactação mini-Proctor cujos resultados, para o solo argiloso, estão mostrados na Figura 35; a Figura 36 mostra tais parâmetros obtidos para o solo argiloso adicionado de cal. Os parâmetros de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do ensaio de compactação mini-Proctor estão mostrados nas Figuras 37 e 38, para o solo arenoso com e sem cal, respectivamente. Tendo em vista a não variação dos valores dos parâmetros de compactação do ensaio Proctor normal, não foi realizado o ensaio mini-Proctor para as misturas com resíduo.

Como se pode verificar pelas figuras apresentadas, tanto a metodologia como a forma de ajustar os pontos obtidos do ensaio são diferentes para cada caso. Tradicionalmente, aos parâmetros de umidade ótima e peso específico do ensaio de compactação normal de Proctor, após lançados no gráfico, ajusta-se a eles uma parábola, cujo ponto máximo, na ordenada, identifica o peso específico aparente seco máximo e, na abscissa, a umidade ótima correspondente. No ensaio mini-Proctor, por outro lado, principalmente se aplicado a solos tropicais (NOGAMI e VILLIBOR, 1995), os parâmetros de compactação são obtidos pela intersecção de duas retas, a do tramo seco com a do úmido, caracterizando um pico.

Nas Figuras 39 e 40 acham-se comparados os valores obtidos de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima correspondente para os dois processos, respectivamente.

No caso específico do solo argiloso (T1), observa-se grande diferença (10%) entre os valores de peso específico aparente seco máximo, diferença esta menor (7%) quando ao solo se adiciona cal (T4). No caso do solo arenoso, as

diferenças não foram significativas, sendo os valores estatisticamente iguais entre si, quer se adicionasse a ele cal (T10), quer não (T7).

Com relação aos teores de umidade ótima, obtidos pelos dois processos, verifica-se que para o solo argiloso (T1), a diferença foi de 13%, enquanto que, para o solo-cal, 7%. No caso do solo arenoso, não ocorreram diferenças estatisticamente significativas, em quaisquer condições, com ou sem adição de cal.

A explicação para tais diferenças pode estar nos procedimentos experimentais associados a cada ensaio, a saber.

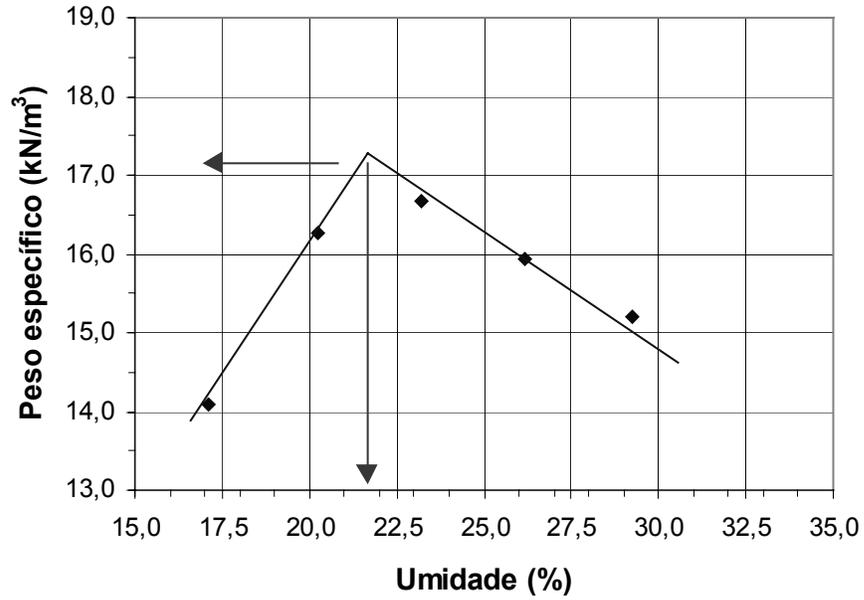
Para o ensaio de compactação normal de Proctor:

- amostra passada na peneira n<sup>o</sup> 4 (4,76 mm);
- misturas homogeneizadas e simultaneamente compactadas por ocasião da moldagem dos corpos-de-prova;
- soquete que facilita a saída do ar presente no solo sob compactação;
- heterogeneidade da amostra.

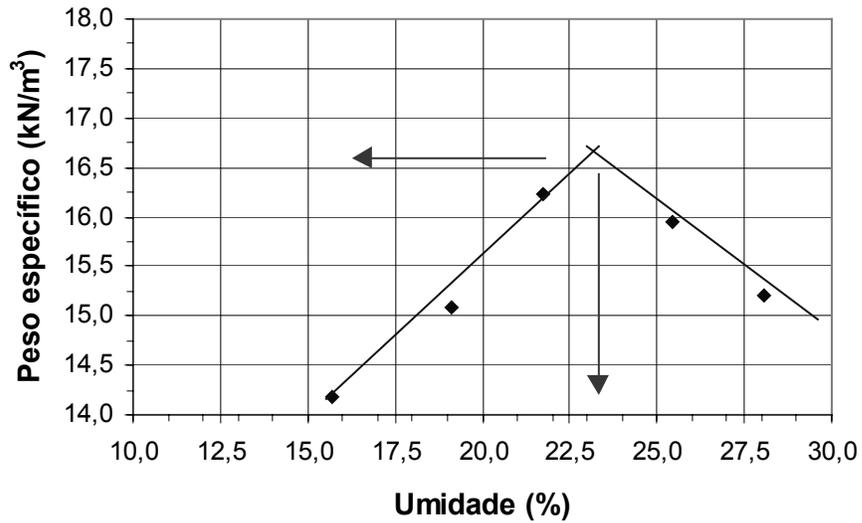
Para o ensaio de compactação mini-Proctor:

- amostra passada na peneira n<sup>o</sup> 10 (2,00 mm);
- umedecimento prévio da amostra, o que a torna mais homogênea;
- soquete de seção plena, que dificulta a saída de ar da amostra de solo sob compactação mas permite uma melhor distribuição da energia de compactação por volume;
- ensaio sem re-uso da amostra.

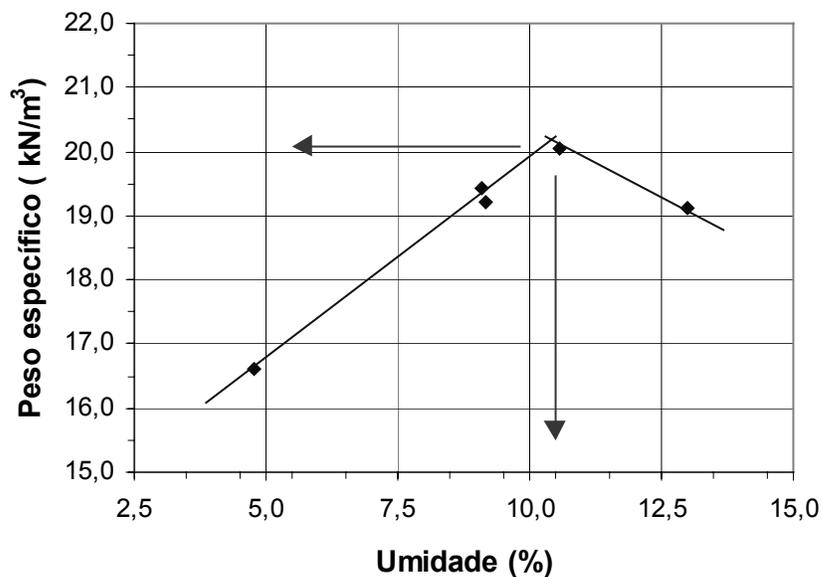
Essas comparações são melhor discutidas por NOGAMI (1972) e NOGAMI e VILLIBOR (1995): sendo aqui relatadas apenas as diferenças observadas e verificadas através dos ensaios (Figuras 39 e 40). Outros autores também constataram diferenças significativas no ensaio de compactação relacionadas à perda de umidade do solo durante o manuseio e compactação dos corpos-de-prova (AQUINO FILHO e NOGUEIRA, 1994).



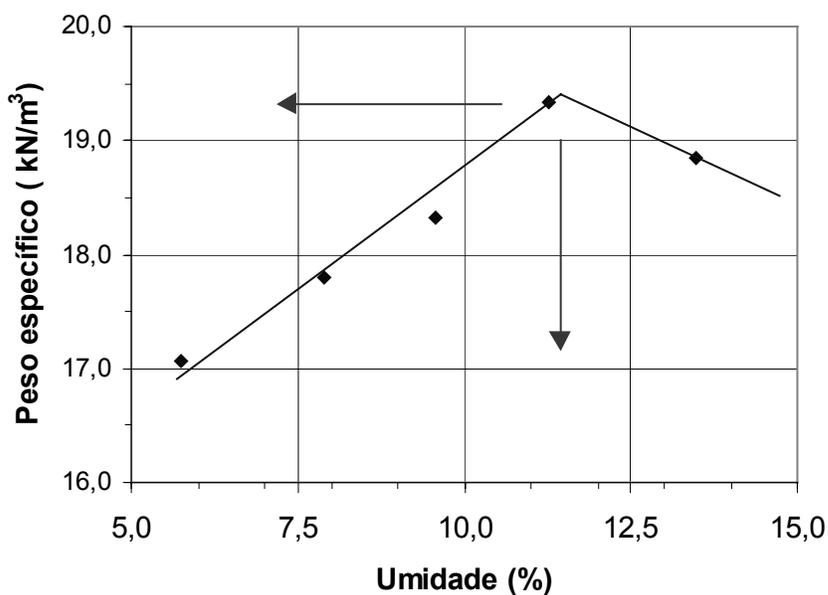
**FIGURA 35** - Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do solo argiloso sem adição de cal.



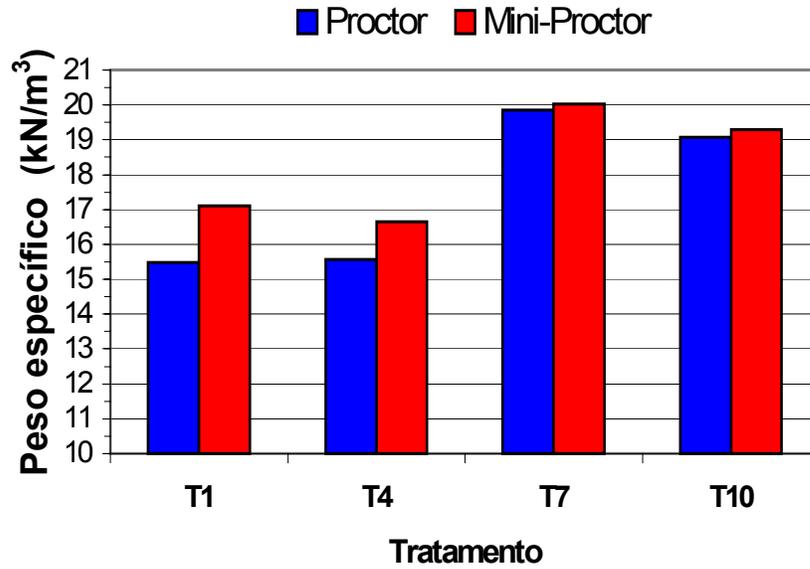
**FIGURA 36** - Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do solo argiloso adicionado de cal.



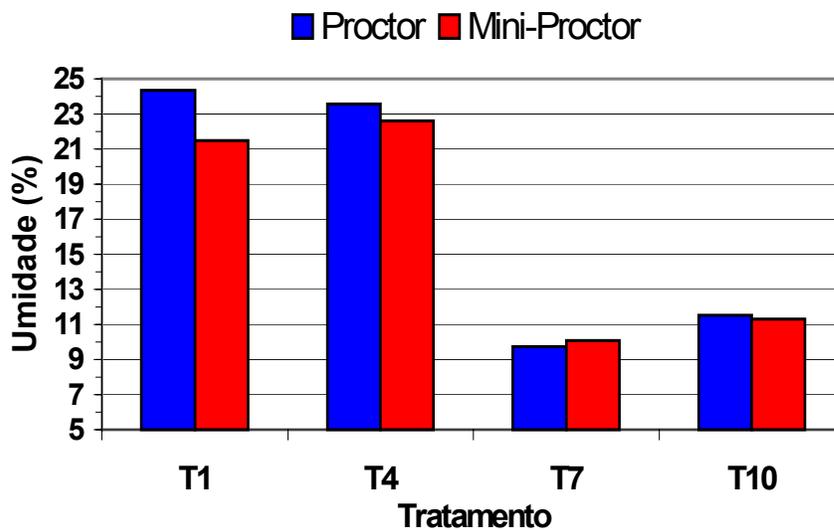
**FIGURA 37** - Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do solo arenoso sem adição de cal.



**FIGURA 38** - Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima do solo arenoso adicionado de cal.



**FIGURA 39** - Comparação entre os pesos específicos aparentes secos máximos obtidos do ensaio de compactação normal de Proctor e do ensaio mini-Proctor.



**FIGURA 40** - Comparação entre as umidades ótimas obtidas do ensaio de compactação normal de Proctor e do ensaio mini-Proctor.

Para NOGAMI (1972), DER/SP (1992) e VILAR e ROHM (1994), merecem atenção especial o umedecimento prévio e o re-uso da amostra, bem como o seu manuseio durante o ensaio. Levando-se em conta o volume de solo necessário e a energia dispendida pelo operador, o ensaio mini-Proctor leva enorme vantagem sobre o Proctor normal.

#### **4 . 3 . 4 . Resistência à compressão simples**

Os valores de resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo argiloso e de solo argiloso com adição de 3% de cal e tratados com “água-de-cola”, estão mostrados no Quadro 31; para o solo arenoso e solo arenoso com adição de 3% de cal e tratados com “água-de-cola”, no Quadro 32. Nas figuras 41, 42, 43 e 44 estão representados os valores de resistência à compressão simples, simultaneamente, para os solos argiloso e arenoso, enquanto que a evolução da resistência com o tempo de cura, para o solo argiloso, está apresentada na Figura 45 e, para o arenoso, na Figura 46.

Em se tratando da resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo-resíduo e de solo-cal, a análise de variância mostrou altos níveis de significância estatística, para as causas de variação tratamento, solo, época de rompimento e suas interações (Quadros 31 e 32).

O teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade estatística, mostrou que o tratamento de ambos os solos com “água-de-cola”, em diversas concentrações, e 3% de cal, aumentou significativamente a resistência à compressão simples. No caso específico do solo argiloso tratado com 15% de “água-de-cola” e cal, o maior valor de resistência foi alcançado pelo tratamento T6, seguido de T3, T4 e T5, iguais entre si, e pelo tratamento T2, todos superiores à testemunha (T1). No caso do solo arenoso, os melhores resultados foram alcançados pelos tratamentos T8 e T9, iguais à testemunha (T7), seguidos de T12, T11 e T10, iguais entre si, e todos inferiores à testemunha (T7).

**QUADRO 31** - Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo argiloso e de solo argiloso com adição de 3% de cal, sob tratamento com água-de-cola com diferentes concentrações de PVA (em MPa).

Idade de rompimento		solo tratado com 15% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 15% de água-de-cola concentrada a		
		0% (T1)	5% (T2)	10% (T3)	0% (T4)	5% (T5)	10% (T6)
14 dias	A	1,77	1,93	1,84	1,65	1,75	1,73
	B	1,91	1,84	1,78	1,58	1,68	1,62
	C	1,63	1,78	1,71	1,73	1,89	1,83
	X	1,77 a	1,85 a	1,77 a	1,65 a	1,77 a	1,73 a
21 dias	A	-	2,07	1,65	1,73	1,43	1,65
	B	-	2,10	1,62	2,04	1,46	1,94
	C	-	1,91	1,69	2,04	1,75	1,79
	X	1,77acb	2,03 a	1,65 bc	1,94 ab	1,55 c	1,79 abc
90 dias	A	-	1,91	2,8	2,22	2,14	2,6
	B	-	1,83	1,78	2,04	2,45	2,14
	C	-	2,01	2,29	2,11	1,91	2,34
	X	1,77c	1,92 bc	2,29 a	2,12 ab	2,17 ab	2,36 a
180 dias	A	-	1,78	2,55	2,34	2,50	2,47
	B	-	1,78	2,55	2,5	2,34	2,42
	C	-	1,85	2,47	2,68	2,37	2,60
	X	1,77b	1,80 b	2,52 a	2,51 a	2,40 a	2,50 a

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

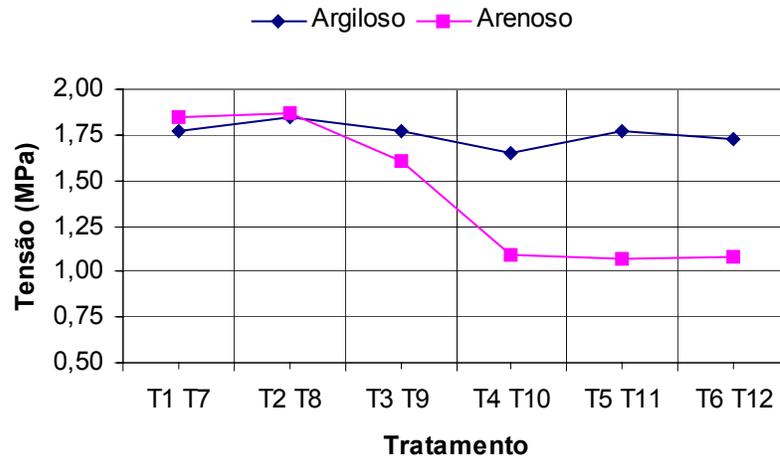
Aos 14 dias, os valores de resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo argiloso (Figura 41) tratados com “água-de-cola” concentrada e cal, não diferiram estatisticamente da testemunha (T1). No caso do solo arenoso, os maiores valores de resistência foram conseguidos para os tratamentos T8 e T9, iguais à testemunha (T7), seguidos dos tratamentos T10, T12 e T,11, iguais entre si, e todos inferiores à testemunha.

**QUADRO 32** - Resistência à compressão simples de corpos-de-prova de solo arenoso e de solo arenoso com adição de 3% de cal, sob tratamento com água-de-cola com diferentes concentrações de PVA (em MPa).

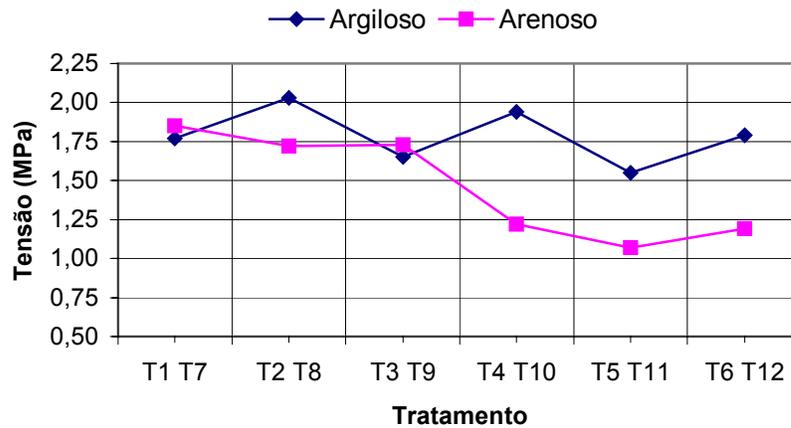
Idade de rompimento		solo tratado com 8% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 8% de água-de-cola concentrada a		
		0% (T7)	5% (T8)	10% (T9)	0% (T10)	5% (T11)	10% (T12)
14 dias	A	1,85	1,78	1,63	1,02	1,07	1,02
	B	1,96	1,96	1,66	1,27	1,02	1,02
	C	1,74	1,87	1,55	0,98	1,13	1,19
	X	1,85 a	1,87 a	1,61 a	1,09 b	1,07 b	1,08 b
21 dias	A		1,66	1,63	1,17	1,17	1,27
	B		1,72	1,78	1,17	1,02	1,07
	C		1,78	1,78	1,32	1,02	1,22
	X	1,85a	1,72 a	1,73 a	1,22 b	1,07 b	1,19 b
90 dias	A	-	1,99	1,78	1,34	1,38	1,53
	B	-	1,91	2,09	1,20	1,53	1,53
	C	-	1,86	2,09	1,36	1,58	1,78
	X	1,85 ab	1,92 ab	1,99 a	1,30 c	1,49 c	1,61 bc
180 dias	A		1,87	1,91	1,38	1,76	1,65
	B		1,91	1,83	1,66	1,59	1,73
	C		1,78	2,09	1,4	1,53	1,85
	X	1,85 a	1,86 a	1,94 a	1,48 b	1,63 ab	1,74 ab

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade

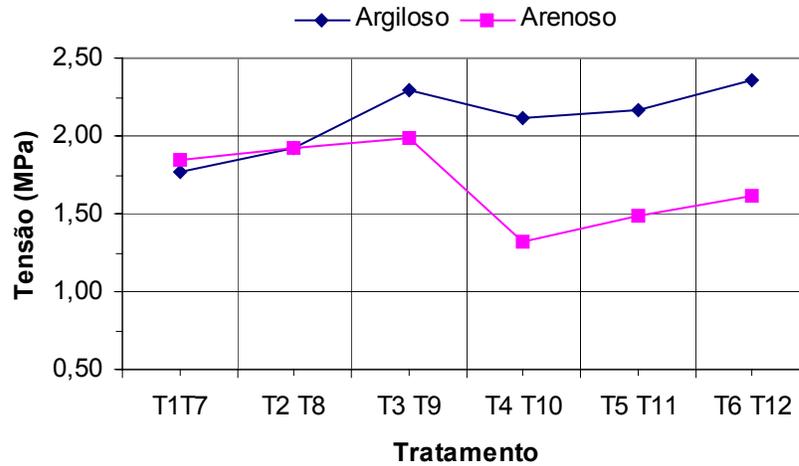
Aos 21 dias, o solo argiloso tratado com 15% de “água-de-cola” concentrada e cal (Figura 42), apresentou o maior valor de resistência para o tratamento T2, seguido do T4, T6, e à testemunha (T1), iguais entre si, e os tratamentos T3 e T5, diferentes entre si, e inferiores à testemunha. No caso específico do solo arenoso, os maiores valores foram alcançados pelos os tratamentos à testemunha (T7), T9 e T8, iguais entre si, em seguida os tratamentos T10, T12 e T11 iguais entre si.



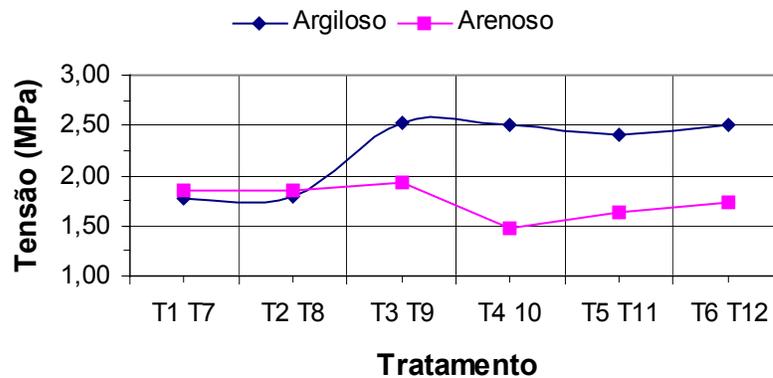
**FIGURA 41** – Resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo e de solo-cal tratados com diferentes doses de “água-de-cola”, em diversas concentrações, rompidos aos 14 dias de idade.



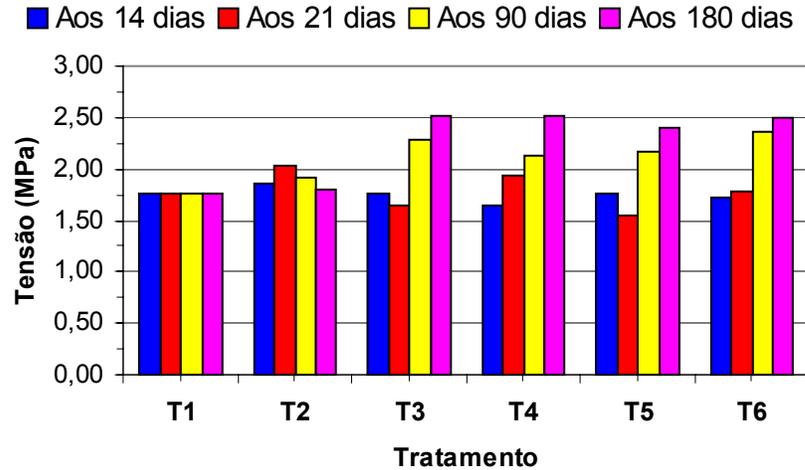
**FIGURA 42** – Resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo e de solo-cal tratados com diferentes doses de “água-de-cola”, em diversas concentrações, rompidos aos 21 dias de idade.



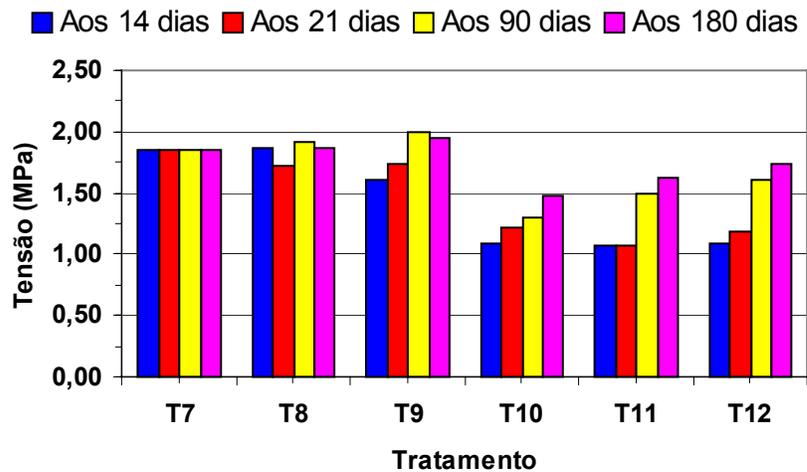
**FIGURA 43** – Resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo e de solo-cal tratados com diferentes doses de “água-de-cola”, em diversas concentrações, rompidos aos 90 dias de idade.



**FIGURA 44** – Resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo e de solo-cal tratados com diferentes doses de “água-de-cola”, em diversas concentrações, rompidos aos 180 dias de idade.



**FIGURA 45** – Evolução da resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo argiloso e de solo argiloso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola”, em diversas concentrações.



**FIGURA 46** – Evolução da resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo arenoso e de solo arenoso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola”, em diversas concentrações.

Aos 90 dias (Figura 43), os melhores resultados de resistência à compressão simples, para o solo argiloso tratado com 15% de “água-de-cola” e cal, foram alcançados pelos tratamentos T6 e T3, iguais entre si, seguidos pelos tratamentos T5 e T4, também iguais entre si, e T2, sendo todos superiores à testemunha (T1). Para o solo arenoso, tratado com 8% de “água-de-cola” e cal, os maiores valores foram alcançados com o tratamento T9, seguidos de T8 e T7 (testemunha), todos superiores a T12, e os tratamentos T11 e T10, iguais entre si e inferiores, também, à testemunha (T7).

No que se refere à resistência à compressão simples, aos 180 dias (Figura 44), para o solo argiloso, os maiores valores foram alcançados pelos tratamentos T3, T4, T6 e T5, iguais entre si, seguidos dos tratamentos T2 e T1. No caso específico do solo arenoso, os maiores valores foram alcançados pelos tratamentos T9 e T8, iguais à testemunha (T7), seguidos pelos tratamentos T12 e T11, iguais entre si, e finalmente T10.

Para o solo sem tratamento, a resistência à compressão simples de corpos-de-prova de ambos os solos, rompidos aos 14 dias de idade, foram estatisticamente iguais entre si. No caso específico do solo tratado com “água-de-cola” concentrada a 5% (T2 e T8), o efeito foi semelhante para ambos os solos. Para os demais tratamentos, independentemente da dose de “água-de-cola” e concentração utilizadas, em presença ou não de cal, o melhor resultado foi obtido para o solo argiloso, em relação ao arenoso.

No que diz respeito ao tempo de cura, independentemente da época de rompimento, o solo argiloso alcançou maiores valores de resistência do que o arenoso.

Para ambos os solos e para quaisquer idades de ruptura, o tratamento com “água-de-cola” concentrada a 5% não resultou em diferenças estatísticas nos valores de resistência à compressão simples (Figuras 45 e 46), exceção feita para

a idade de 21 dias, quando o solo argiloso foi superior ao arenoso. Para a concentração de 10% (T2 e T8), os valores de resistência à compressão (Figuras 45 e 46) foram iguais entre si aos 14 e 21 dias, independentemente do tipo de solo empregado, sendo que aos 90 e 180 dias, o solo argiloso alcançou valores de resistência superiores ao arenoso.

No caso específico da adição ao solo de 3% de cal, independentemente do tempo de cura o solo argiloso alcançou sempre valores de resistência superiores ao arenoso. A mesma tendência também foi observada para os tratamentos com cal e “água-de-cola” concentrada a 5 e 10%, comprovando assim que a cal reage melhor com solos coesivos (SVENSON, 1981).

Com relação ao período de cura, os maiores valores de resistência foram alcançados aos 180 dias, seguidos do período de 90 dias; aos 21 e 14 dias de cura, os valores de resistência não diferiram estatisticamente entre si. Para o tratamento do solo com “água-de-cola” concentrada a 5% (T2 e T8), os valores de resistência para todas as épocas foram estatisticamente iguais entre si. No caso da concentração de 10% (T3 e T9), os maiores valores foram alcançados aos 180 e 90 dias, iguais entre si, seguidos dos 14 e 21 dias, também iguais entre si. Esse fato evidencia que, para o solo tratado unicamente com “água-de-cola”, independentemente da concentração utilizada, não há ganhos de resistência com o aumento do tempo de cura.

No caso especial do solo tratado com cal, os ganhos de resistência aumentaram com o período de cura. Para os tratamentos do solo-cal com “água-de-cola” concentrada a 5 e 10%, os maiores valores de resistência foram obtidos aos 180 e 90 dias, estatisticamente iguais entre si, seguidos dos 14 e 21 dias, também iguais entre si, mais uma vez evidenciando o ganho de resistência ao longo do tempo, corroborando as conclusões de SVENSON (1981).

#### 4 . 3 . 5 . Resistência à tração na compressão diametral

Os valores de resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, para o solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com “água-de-cola”, estão mostrados no Quadro 33; para o solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal e tratados com “água-de-cola”, no Quadro 34. Nas figuras 47, 48, 49 e 50 estão representados os valores de resistência à tração na compressão diametral, simultaneamente para o solo argiloso e arenoso aos 14, 21, 90 e 180 dias de cura, enquanto que a evolução da resistência em função do tempo de cura está apresentado nas Figuras 51 e 52, para os solos argiloso e o arenoso, respectivamente.

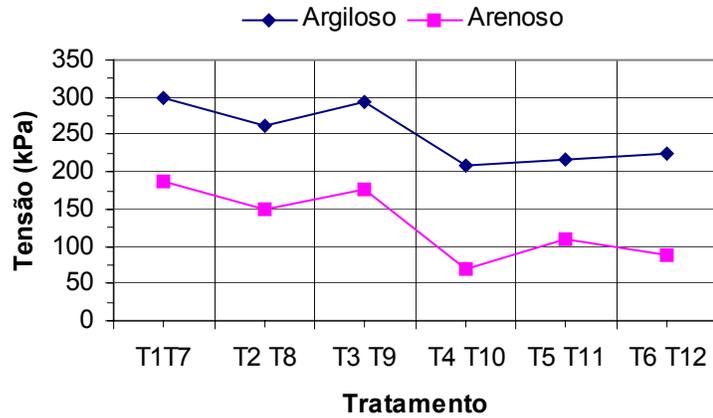
**QUADRO 33** - Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, sob tratamento com água-de-cola em diferentes concentrações de PVA (em kPa).

Idade de rompimento		solo tratado com 15% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 15% de água-de-cola concentrada a		
		0% (T1)	5% (T2)	10% (T3)	0% (T4)	5% (T5)	10% (T6)
14 dias	A	307,86	236,2	281,32	201,7	185,77	228,24
	B	299,89	212,31	318,47	186,32	238,85	249,47
	C	291,93	244,16	278,66	238,85	222,93	199,04
	X	299,89	260,89	292,82	208,96	215,85	225,58
21 dias	A	-	252,12	398,09	199,04	238,85	228,24
	B	-	225,58	387,47	199,04	188,43	199,04
	C	-	228,24	281,32	244,16	222,93	252,12
	X	299,89	235,31	355,63	214,08	216,74	226,47
90 dias	A	-	238,85	276,01	238,85	252,12	265,39
	B	-	228,24	286,62	249,47	169,85	254,78
	C	-	207,01	281,32	228,24	222,93	265,39
	X	299,89	224,7	281,32	238,85	214,97	261,85
180 dias	A	-	217,62	286,62	254,78	254,78	260,08
	B	-	212,31	281,32	270,7	228,24	281,32
	C	-	207,01	249,47	233,55	217,62	276,01
	X	299,89	212,31	272,47	253,01	233,55	272,47

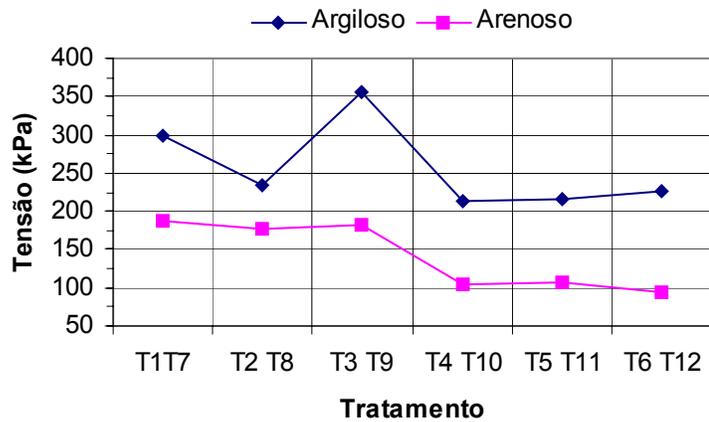
**QUADRO 34** - Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal, sob tratamento com água-de-cola em diferentes concentrações de PVA (em kPa).

Idade de rompimento		solo tratado com 8% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 8% de água-de-cola concentrada a		
		0% (T1)	5% (T1)	10% (T1)	0% (T10)	5% (T11)	10% (T12)
14 dias	A	204,35	153,93	175,16	69,00	95,54	84,93
	B	191,08	143,31	175,16	79,62	116,77	92,89
	C	164,54	153,93	175,16	63,69	114,12	87,58
	X	186,66	150,39	175,16	70,77	108,81	88,46
21 dias	A	-	164,54	177,81	100,85	100,85	95,54
	B	-	185,77	191,08	111,46	90,23	84,93
	C	-	180,47	177,81	100,85	127,39	100,85
	X	186,66	176,93	182,24	104,39	106,16	93,77
90 dias	A	-	191,08	175,16	164,54	159,24	153,93
	B	-	191,08	193,74	148,62	153,93	138,00
	C	-	191,08	175,16	138,00	148,62	148,62
	X	186,66	191,08	181,35	150,39	153,93	146,85
180 dias	A	-	201,7	169,85	180,47	191,08	153,93
	B	-	180,47	196,39	185,77	207,01	175,16
	C	-	185,77	169,85	169,85	186,62	159,24
	X	186,66	189,31	178,70	178,70	194,90	162,77

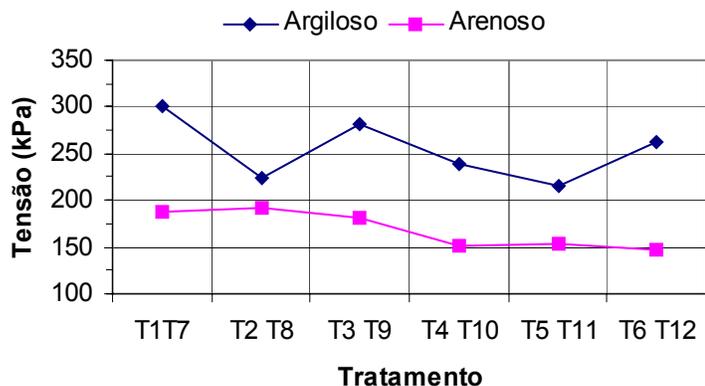
Em se tratando da resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo-resíduo “água-de-cola” a análise de variância mostrou altos níveis de significância estatística, ao nível de 5% de probabilidade, para as causas de variação tratamento, solo, tempo de cura e suas interações, exceção feita para a interação tratamento x solo x tempo de cura.



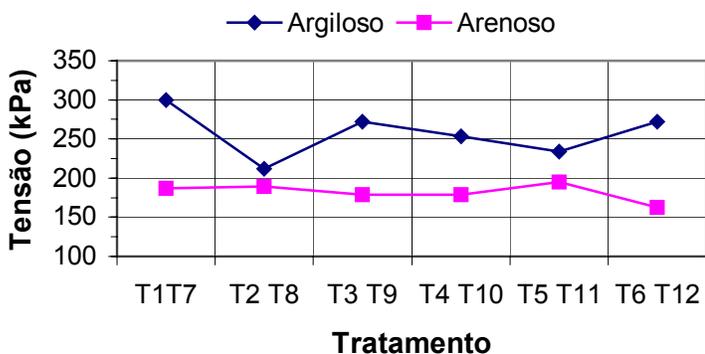
**FIGURA 47** – Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo e solo adicionado de cal, tratados com “água-de-cola” em diversas concentrações, e rompidos aos 14 dias de idade.



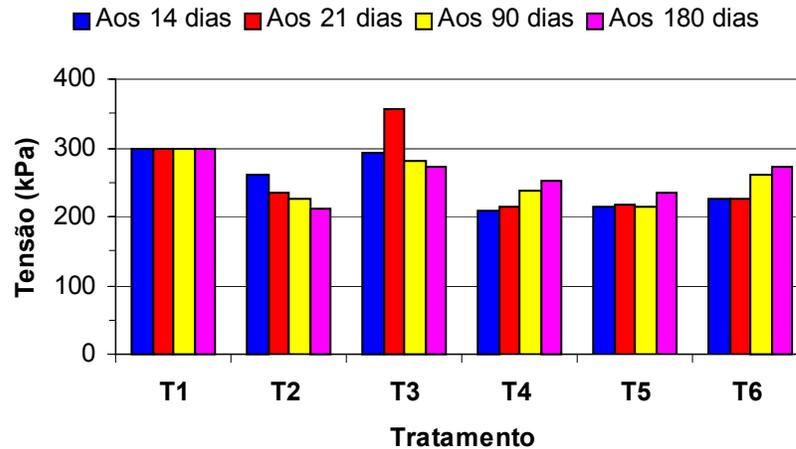
**FIGURA 48** – Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo e solo adicionado de cal, tratados com “água-de-cola” em diversas concentrações, e rompidos aos 21 dias de idade.



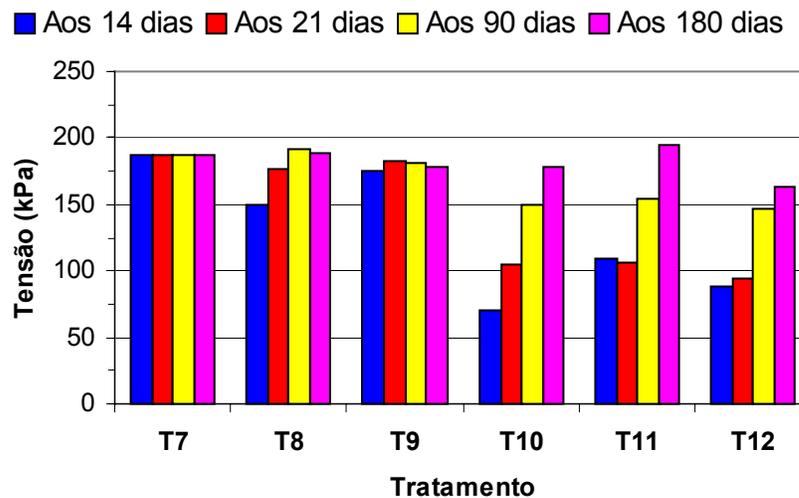
**FIGURA 49** – Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo e solo adicionado de cal, tratados com “água-de-cola” em diversas concentrações, e rompidos aos 90 dias de idade.



**FIGURA 50** – Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo e solo adicionado de cal, tratados com “água-de-cola” em diversas concentrações, e rompidos aos 180 dias de idade.



**FIGURA 51** – Evolução da resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações.



**FIGURA 52** – Evolução da resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal, tratados com 8% de “água-de-cola” em diversas concentrações.

O teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade estatística, indicou que o tratamento do solo com “água-de-cola” reduziu significativamente a resistência à tração na compressão diametral em relação à testemunha, aos 14, 21, 90 e 180 dias de cura; para o solo argiloso, os melhores resultados foram alcançados pelos tratamentos T3 e T1 (testemunha), iguais entre si, seguidos do tratamento T6; e as maiores reduções foram alcançadas pelos tratamentos T4 e T2, iguais entre si, seguidos de T5. No caso do solo arenoso, os melhores resultados foram obtidos pela testemunha (T7) e pelos tratamentos T9 e T8, iguais entre si, seguidos pelos tratamentos T11, T10 e T12, que também não diferiram entre si.

Aos 14 dias de idade (Figura 47), o tratamento de ambos os solos com “água-de-cola” e cal levou a menores valores de resistência à tração, sendo os tratamentos T3 e T9 estatisticamente iguais às testemunhas T1 e T7, respectivamente, e superiores aos demais; os menores valores foram apresentados pelos tratamentos T4 e T10.

Aos 21 dias de idade (Figura 48), o tratamento de ambos os solos com “água-de-cola” e cal também levou a menores valores de resistência à tração, sendo os tratamentos T3 e T9 iguais às testemunhas T1 e T7, respectivamente, e superiores aos demais. Aos 90 dias de idade (Figura 49), por outro lado, todos os valores de resistência à tração foram inferiores aos das testemunhas T1 e T7, sendo os maiores valores alcançados pelos tratamentos T3 e T9.

Aos 180 dias de idade (Figura 50), os mesmos tratamentos de ambos os solos levaram a valores de resistência à tração ainda menores e inferiores aos das testemunhas, sendo os melhores resultados alcançados pelos tratamentos T3 e T9, T6 e T12, T4 e T10, e T5 e T11, estatisticamente iguais entre si.

De um modo geral, o solo argiloso respondeu melhor ao tratamento com “água-de-cola” e cal que o solo arenoso, independentemente do tratamento aplicado e do tempo de cura. No caso específico do tempo de cura, os maiores

valores de resistência à tração foram alcançados aos 180 dias (Figuras 51 e 52), seguidos dos 90, 21 e 14 dias.

Para o solo sem tratamento, todos os corpos-de-prova foram rompidos aos 14 dias de idade. Com relação ao tratamento com "água-de-cola" concentrada a 5% (T2 e T8), os valores de resistência à tração foram todos iguais entre si, independentemente do tempo de cura considerado. No caso do solo com a concentração 10% de "água-de-cola" (T3 e T9), todos os tratamentos não diferiram estatisticamente entre si, exceção feita aos 21 dias de idade, quando se alcançou o maior valor de resistência à tração. Mais uma vez, fica evidenciado que o tratamento do solo com "água-de-cola", independentemente da concentração empregada, não aumentou sua resistência ao longo do tempo de cura.

No caso específico dos solos tratados com 3% de cal, os maiores valores de resistência à tração foram alcançados aos 180 e 90 dias de idade, valores iguais entre si, seguidos dos 21 e 14 dias, também iguais entre si; o mesmo comportamento foi apresentado pelo solo-cal tratado com "água-de-cola" concentrada a 10%. Contudo, na concentração de 5%, os maiores valores de resistência foram alcançados aos 180 dias, sendo todos os demais inferiores e iguais entre si.

Com relação ao tempo de cura e no caso do solo argiloso tratado com 15% de "água-de-cola" e cal, os valores de resistência à tração foram iguais entre si, independentemente do tempo de cura considerado. No caso do solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal e tratado com 8% de "água-de-cola", os maiores valores de resistência foram obtidos aos 180 e 90 dias de idade, valores estes iguais entre si, seguidos dos valores tomados aos 21 e 14 dias, também estatisticamente iguais entre si.

A partir da simples observação da Figura 51, verifica-se que, para o tratamento do solo argiloso com 15% de "água-de-cola" concentrada a 5% (T2),

foram registrados valores decrescentes de resistência à tração com o aumento do tempo de cura; para o tratamento T3, exceção feita aos 21 dias de cura, os valores de resistência à tração não diferiram entre si.

Para o solo tratado com 3% de cal (Figuras 51 e 52), a resistência à tração não evoluiu com o tempo de cura, como se esperava, provavelmente devido ao efeito da carbonatação, em detrimento das reações pozolânicas, e à variação da composição da cal comercial utilizada na confecção dos corpos-de-prova, uma vez que foram usados lotes diferentes de cal, sem conhecimento de sua composição química, podendo parte dela estar carbonatada, interferindo assim fortemente na resistência mecânica do solo cal, efeito este já constatado por SVENSON (1981).

Para o solo arenoso (Figura 52), tratado com 8% de "água-de-cola", observou-se que o comportamento do tratamento T8 foi inverso, em relação ao solo argiloso (Figura 49), o mesmo não ocorrendo com o tratamento T9 (concentração de 10%). Para o solo-cal, observou-se, de um modo geral, um acréscimo de resistência à tração com o tempo de cura; contudo, para o solo tratado com 8% de "água-de-cola" e cal (tratamentos T11 e T12), a mesma tendência foi observada, exceção feita aos 14 e 21 dias de idade, períodos nos quais a resistência não variou. Esses fatos revelam, mais uma vez, que o efeito da aplicação ao solo do resíduo do polímero PVA foi marcante até os 21 dias, ou pouco mais, atribuindo-se à cal qualquer ganho adicional de resistência que pode, no entanto, eventualmente, até mesmo decrescer.

Um fato muito importante verificado nos corpos-de-prova rompidos à tração e à compressão foi que, sendo compactados sem umedecimento prévio, apresentaram interiormente variada coloração, indicando imperfeita heterogeneização da amostra.

#### **4 . 3 . 6 . Correlação entre a resistência à tração na compressão diametral e a resistência à compressão simples**

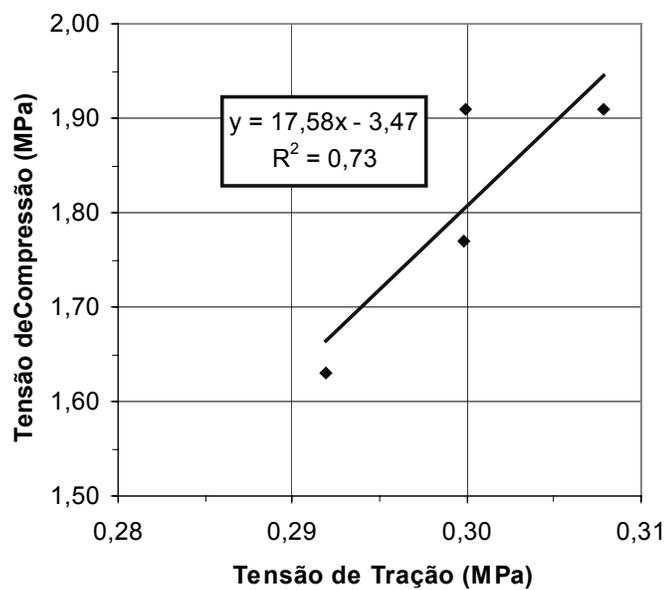
A partir dos valores obtidos de resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos, foram determinadas diversas correlações com o objetivo de levantar uma possível associação entre esses dois parâmetros. Para o solo natural, sem quaisquer adições, a correlação é apresentada em separado, enquanto que, para os demais tratamentos, a correlação é conjunta. No caso específico de corpos-de-prova rompidos aos 14 e 21 dias de idade, foi determinada uma correlação conjunta, por se tratar de um espaço de tempo muito curto e não apresentarem os mesmos diferenças tão significativas entre os seus valores; para os demais, rompimentos aos 90 e 180 dias, são apresentadas correlações em separado para cada tratamento.

Na Figura 53 está apresentada a curva de regressão linear entre os valores de resistência à tração e à compressão simples do solo argiloso no estado natural (T1); na Figura 54, a mesma regressão para o solo arenoso. Para a mistura solo-cal, as curvas de regressão correspondentes aos 14 e 21 dias de idade, estão apresentadas na Figura 55; a curva correspondente aos 90 dias, na Figura 56, e, na Figura 57, a correspondente aos 180 dias.

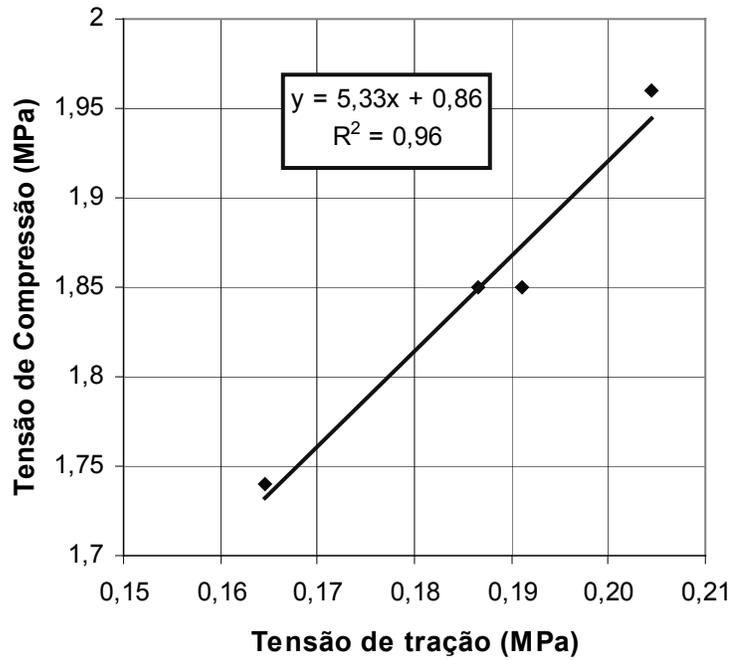
Para o solo-cal tratado com “água-de-cola” concentrada a 5%, e para as idades de 14 e 21 dias, a curva de regressão e o coeficiente de determinação  $R^2$  estão apresentados na Figura 58; na Figura 59, os correspondentes aos 90 dias, e, na Figura 60, os correspondentes aos 180 dias. No caso específico do solo-cal, tratado com “água-de-cola” concentrada a 10% e para as idades de 14 e 21 dias, a curva de regressão e o coeficiente de determinação estão mostrados na Figura 61; os correspondentes aos 90 e 180 dias, estão mostrados, respectivamente, nas Figuras 62 e 63.

Para o solo argiloso (Figura 53), a regressão linear, ajustada aos pontos, apresenta um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,73, revelando uma boa

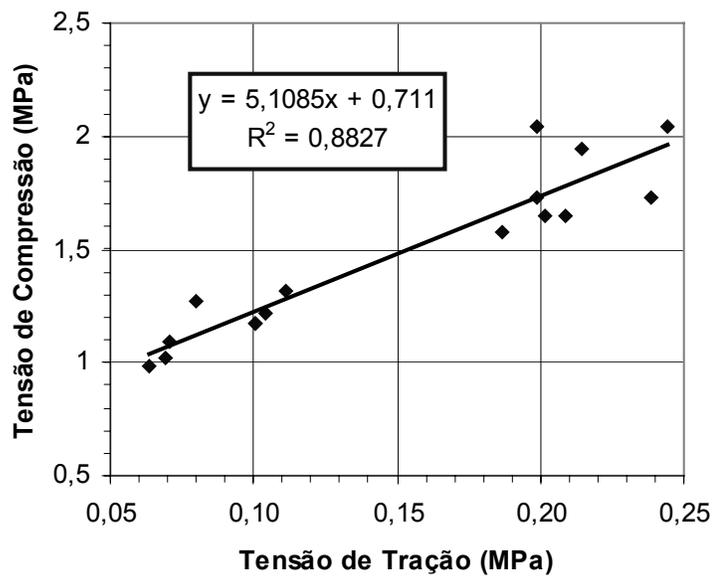
linearidade dos pontos, estando os parâmetros analisados correlacionados entre si, sendo a reta de correlação aceita para efeito de predição. No caso do solo arenoso (Figura 54), a correlação linear apresentou um coeficiente  $R^2$  de 0,96, indicando uma significativa associação entre os dois parâmetros.



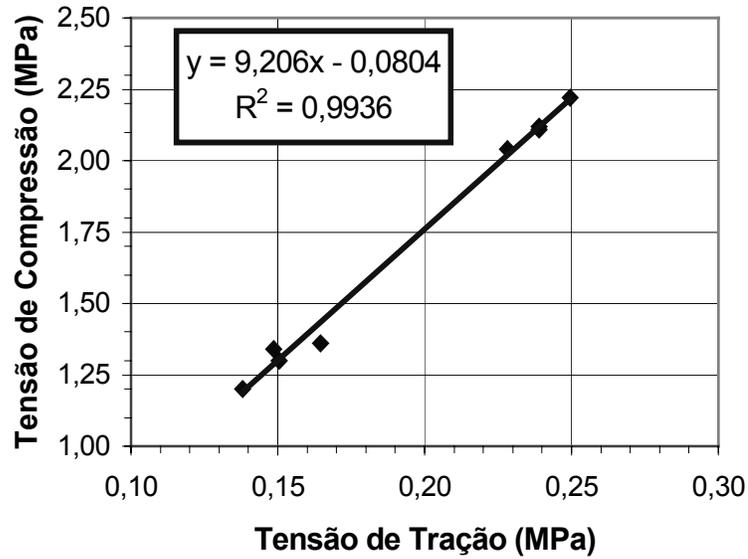
**FIGURA 53** – Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo argiloso.



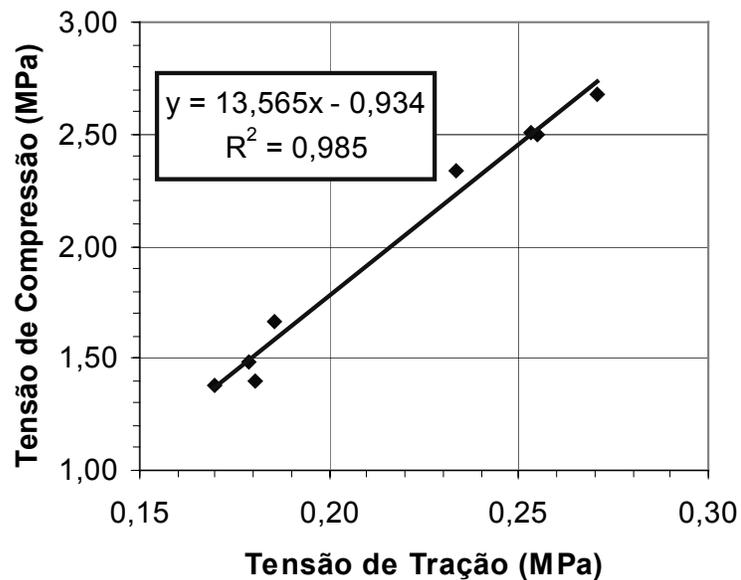
**FIGURA 54** – Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo arenoso.



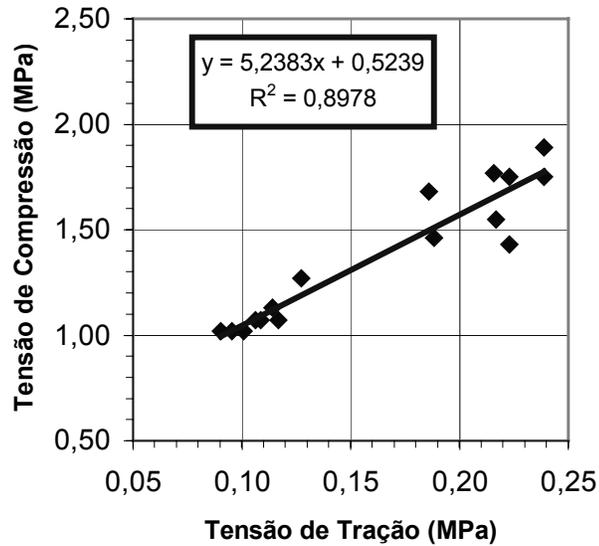
**FIGURA 55** – Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal rompidos aos 14 e 21 dias de idade.



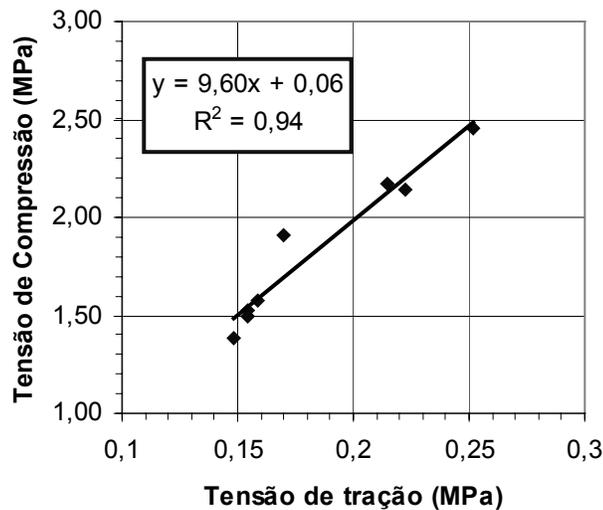
**FIGURA 56** – Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal rompidos aos 90 dias de idade.



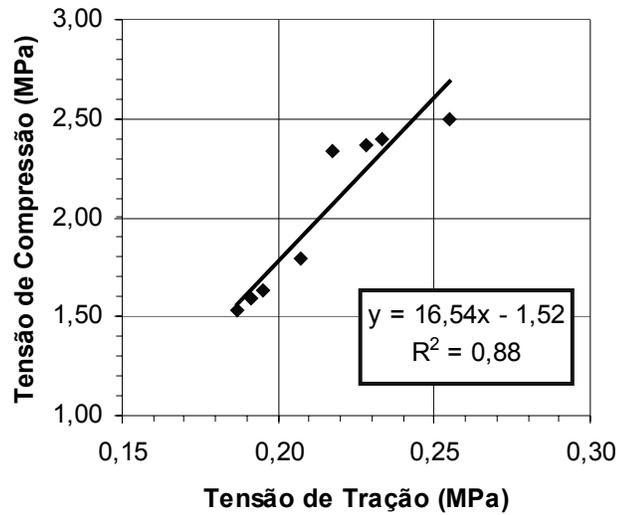
**FIGURA 57** – Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal rompidos aos 180 dias de idade.



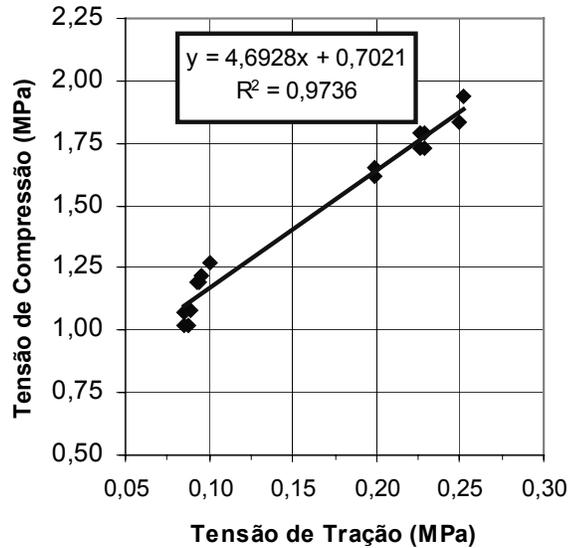
**FIGURA 58** – Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 5%, rompidos aos 14 e 21 dias de idade.



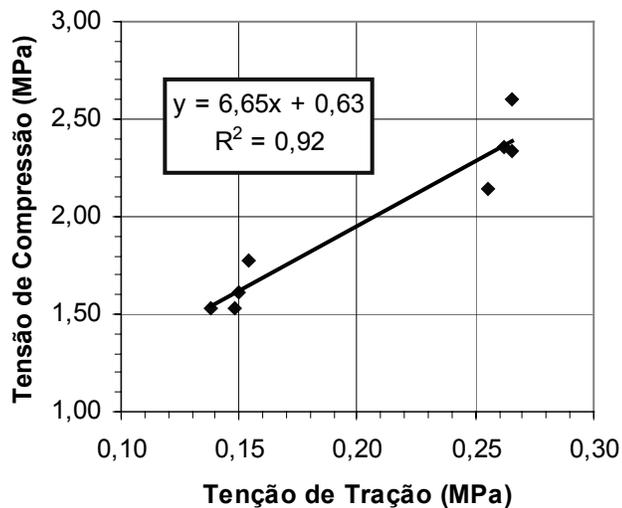
**FIGURA 59** – Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 5%, rompidos aos 90 dias de idade.



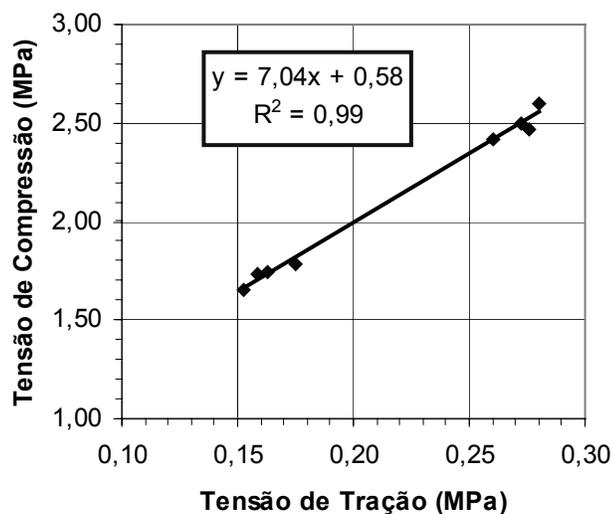
**FIGURA 60** – Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 5%, rompidos aos 180 dias de idade.



**FIGURA 61** – Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 10%, rompidos aos 14 e 21 dias de idade.



**FIGURA 62** – Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 10%, rompidos aos 90 dias de idade.



**FIGURA 63** – Correlação entre a resistência à tração e à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cal, tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 10%, rompidos aos 180 dias de idade.

Com relação ao solo-cal e para as idades de 14 e 21 dias (Figura 55), a curva ajustada aos pontos apresentou um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,88, indicando uma boa associação entre os parâmetros; contudo, os valores obtidos, para os solos arenoso e argiloso, estão agrupados por valores de resistência, associados aos respectivos solos.

Para o solo-cal e para as idades de 90 e 180 dias (Figuras 56 e 57), as retas de regressão apresentaram coeficientes de determinação  $R^2$  iguais a 0,99 e 0,985, respectivamente. Dos períodos de cura considerados, os de 14 e 21 dias foram aqueles que apresentaram a menor correlação, levando a supor que nem sempre é viável o ajuste em conjunto.

Diversos autores estudaram a correlação entre a tensão de tração e a de compressão simples para o material solo-cal, alguns deles justificando a correlação em detrimento da realização de ensaios mecânicos para caracterizar o material, como é o caso de THOMPSON (1967), que apresentou uma relação entre a tensão de tração e a de compressão igual a 0,13, para os solos de Illinois (EUA); outros autores dão importância à simples relação entre aqueles parâmetros (MENDONÇA *et al.*, 1997). A grande preocupação do uso indiscriminado de correlações aplicadas a solos brasileiros é a grande diversidade que há entre eles.

Para o solo-cal tratado com “água-de-cola” concentrada a 5% (Figura 58), os valores de resistência à tração e à compressão, aos 14 e 21 dias, apresentaram um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,90, enquanto que aos 90 e 180 dias, tais valores foram, respectivamente, iguais a 0,94 e 0,88. Todas as correlações foram significativas, indicando que o solo-cal tratado com “água-de-cola” tem seus parâmetros de resistência correlacionáveis entre si.

No caso do solo-cal tratado com “água-de-cola” concentrada a 10% (Figura 59), aos 14 e 21 dias de cura, a reta de regressão apresentou uma determinação

$R^2$  de 0,97; aos 90 e 180 dias, essas correlações foram iguais a 0,92 e 0,99, respectivamente.

Verifica-se que, na maioria dos casos analisados, os solos podem ser agrupados em classes de resistência, sendo o solo argiloso sempre mais resistente que o solo arenoso.

Para o solo tratado com “água-de-cola”, independentemente da concentração utilizada e da época de rompimento, não foram constatadas correlações entre os parâmetros de resistência à tração e à compressão simples, exceção feita ao tratamento com a concentração de 10% e aos 180 dias de cura, cujo valor de  $R^2$  foi de 0,92.

#### **4 . 3 . 7 . Correlação entre o CBR-Adaptado e CBR-DNER**

Na Figura 64 estão representados os valores correspondentes aos 22 ensaios realizados de CBR-Adaptado e de CBR-DNER, para corpos-de-prova compactados simultaneamente, e para os 12 tratamentos aplicados aos solos utilizados. Na mesma Figura estão mostradas também a curva de correlação linear entre as duas variáveis bem como a reta de igualdade, em perfeita correlação. A correlação indica uma associação entre as variáveis CBR-Adaptado e CBR-DNER e é medida através do coeficiente de correlação (R) ou de determinação ( $R^2$ ). No caso em questão, a função linear, o coeficiente de determinação e a correlação, são representados por:

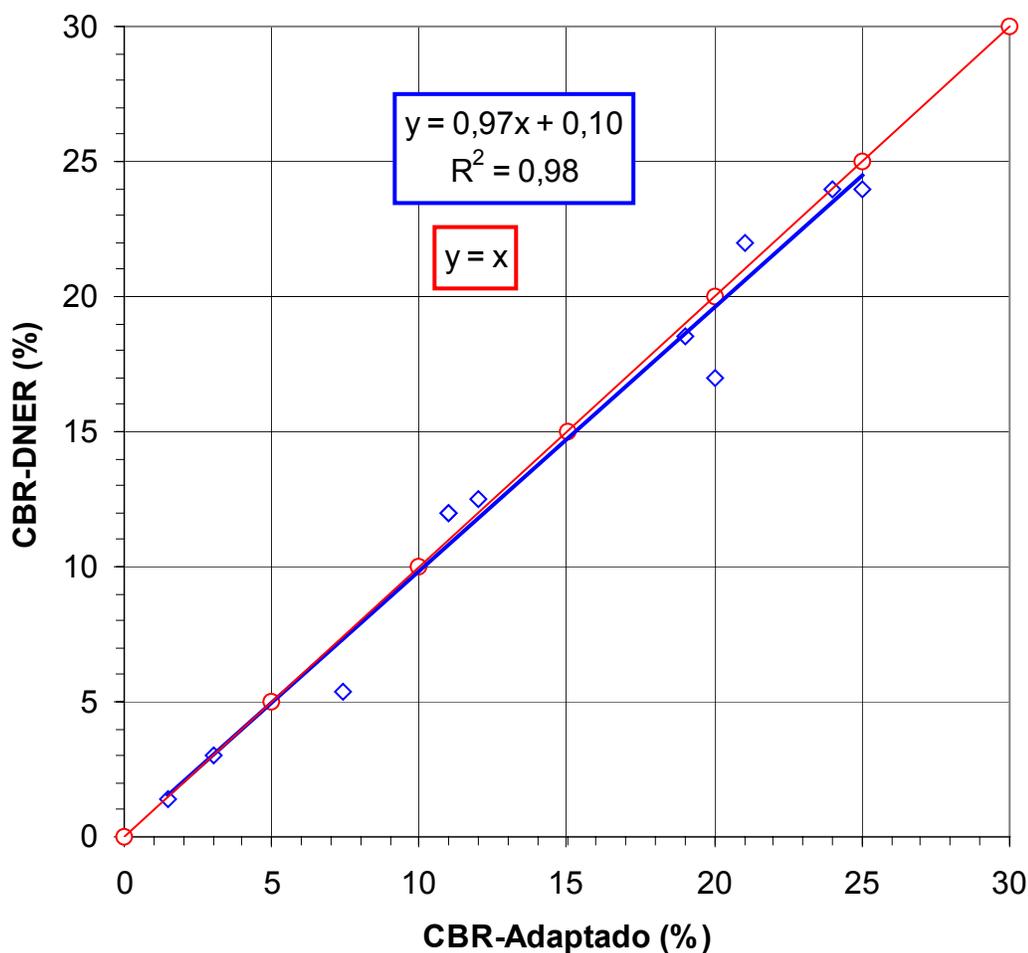
$$R^2 = 0,98$$

$$R = 0,99$$

$$CBR-DNER = 0,97 . (CBR-Adaptado) + 0,10$$

A curva e o coeficiente de correlação indicam que existe uma relação linear entre o CBR-Adaptado e o CBR-DNER, e que a equação de regressão pode ser

utilizada para fins de estimativa ou predição, dentro do intervalo de confiança. Contudo, recomenda-se que sejam realizados outros ensaios para solos com CBR superiores aos obtidos. A proximidade da curva obtida com a reta de igualdade indica, também, que a proporcionalidade entre o molde, o pistão de penetração, a sobrecarga e as penetrações, juntamente com a carga padrão, foi válida. O ligeiro acréscimo do valor de CBR-Adaptado pode ser creditado à melhor distribuição do número de golpes (10, oito nas bordas e dois no centro) em relação ao CBR-DNER (12, dez nas bordas e dois no centro), como mostrou a curva de correlação.



**FIGURA 64** – Correlação entre o CBR-Adaptado e o CBR-DNER.

#### 4.3.8. Índice de suporte CBR-Adaptado

Os índices de suporte Califórnia foram determinados, para os solos argiloso (Quadro 35), e arenoso (Quadro 36) tratados com “água-de-cola” em diferentes concentrações, por meio do ensaio de CBR-Adaptado. As Figuras 65, 66, e 67 apresentam os valores de CBR-Adaptado representados na forma de gráficos, para os solos tratados com cal e curados durante 21, 60 e 120 dias, respectivamente. A variação dos valores de CBR-Adaptado do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações, aos 21, 60 e 120 dias de cura, estão mostrados na Figura 68, enquanto que na Figura 69 estão mostrados os gráficos correspondentes ao solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal.

**QUADRO 35** – Índices de CBR-Adaptado do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal, sob tratamento com água-de-cola em diferentes concentrações de PVA (%).

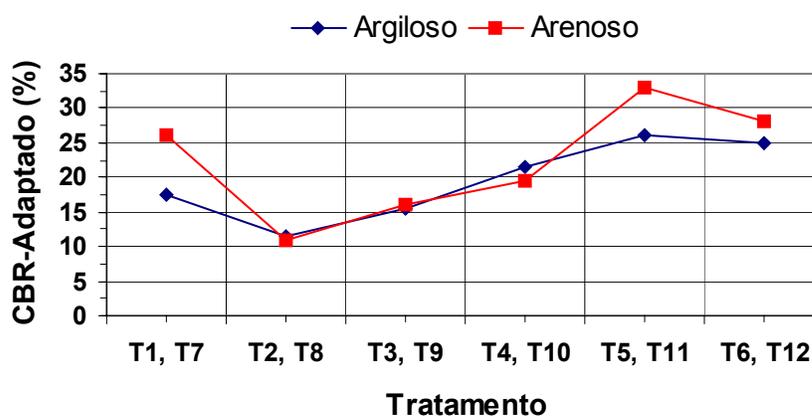
Idade de penetração	solo tratado com 15% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 15% de água-de-cola concentrada a			
	0% (T1)	5% (T2)	10% (T3)	0% (T4)	5% (T5)	10% (T6)	
21 dias	A	17,0	10,0	14,0	19,0	24,0	15,0
	B	16,0	13,0	15,	25,0	26,0	19,0
	X	16,5 abc	11,0 c	15,0 bc	21,0 ab	25,0 a	18,0 abc
60 dias	A	-	14,0	8,5	28,0	20,0	17,0
	B	-	13,0	8,0	24,0	28,0	24,0
	X	16,5 bc	13,5 bc	8,5 c	26,0 a	24,0 ab	20,5 ab
120 dias	A	-	14,0	9,0	35,0	30,0	30,0
	B	-	16,0	7,0	32,0	29,0	25,5
	X	16,5 b	15,0 b	8,0 b	33,5 a	29,5 a	28,0 a

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

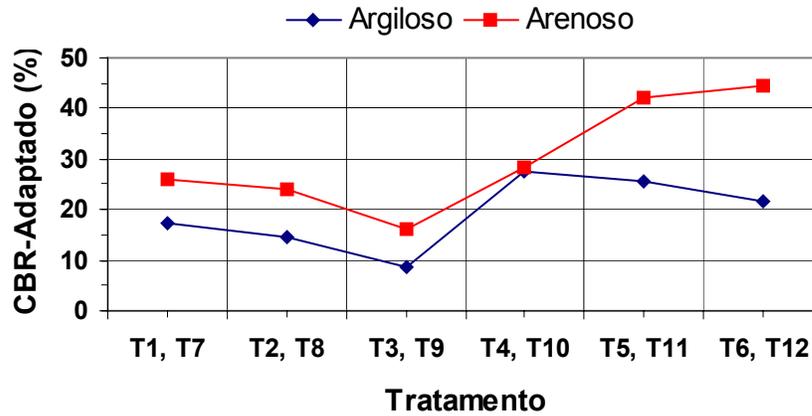
**QUADRO 36** – Índices de CBR-Adaptado do solo arenoso e do solo arenoso adicionado de cal, sob tratamento com água-de-cola em diferentes concentrações de PVA (%).

Idade de rompimento		solo tratado com 8% de água-de-cola concentrada a			solo-cal tratado com 8% de água-de-cola concentrada a		
		0% (T7)	5% (T8)	10% (T9)	0% (T10)	5% (T11)	10% (T12)
21 dias	A	25,0	10,0	15,0	22,0	32,0	24,0
	B	25,0	10,0	15,0	16,0	30,0	28,0
	X	25,0 ab	10,0 c	15,0 c	18,5 bc	31,0 a	26,5 ab
60 dias	A	-	23,0	15,0	20,0	35,0	43,5
	B	-	23,0	15,0	35,0	44,5	41,0
	X	25,0 b	23,0 bc	15,0 c	27,0 b	40,0 a	42,0 a
120 dias	A	-	23,0	19,0	64,0	60,0	43,5
	B	-	20,0	16,0	60,0	69,0	47,0
	X	25,0 c	21,0 c	17,0 c	65,5 a	59,0 a	45,0 b

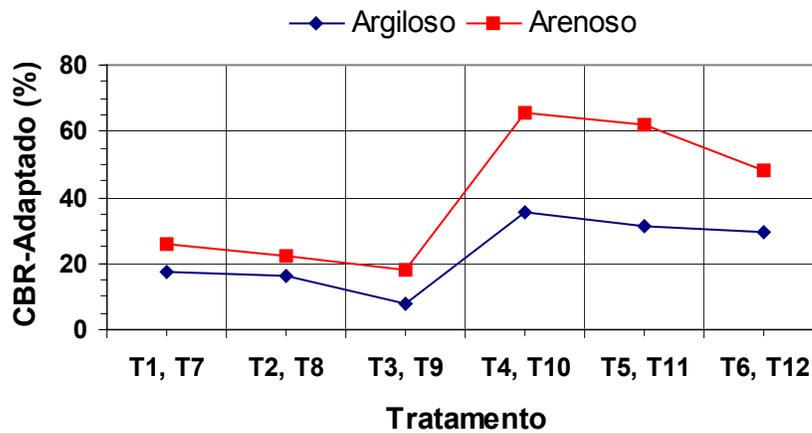
Médias seguidas por letras distintas diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.



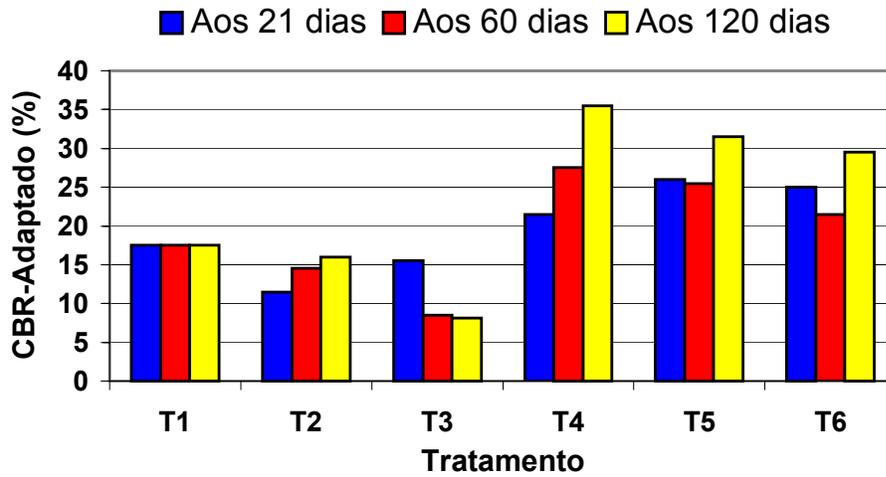
**FIGURA 65** – Valores de CBR-Adaptado dos solos e dos solos adicionados de cal, tratados com doses de 8% e 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações, aos 21 dias de cura.



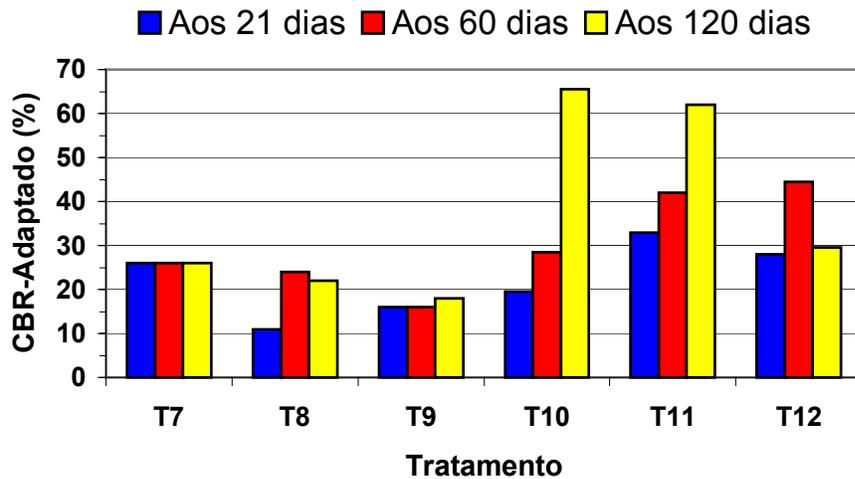
**FIGURA 66** – Valores de CBR-Adaptado dos solos e dos solos adicionados de cal, tratados com doses de 8% e 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações, aos 60 dias de cura.



**FIGURA 67** – Valores de CBR-Adaptado dos solos e dos solos adicionados de cal, tratados com doses de 8% e 15% “água-de-cola” em diversas concentrações, aos 120 dias de cura.



**FIGURA 68** – Variação dos valores de CBR-Adaptado do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal, tratados com a dose de 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações, e aos 21, 60 e 120 dias de cura.



**FIGURA 69** – Variação dos valores de CBR-Adaptado do solo arenoso e do solo arenoso adicionado de cal, tratados com a dose de 8% de “água-de-cola” em diversas concentrações, e aos 21, 60 e 120 dias de cura.

Com relação aos valores de capacidade de suporte (CBR-Adaptado) dos solos argiloso e arenoso tratados com 15% e 8% de “água-de-cola” concentrada a 5 e 10%, e adicionados de cal, a análise de variância acusou significância estatística, ao nível de 5% de probabilidade, para as causas de variação tratamento, solo, época de penetração e suas interações.

O teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, indicou que, para o solo argiloso tratado com 15% de “água-de-cola”, os maiores valores foram alcançados pelos tratamentos T4 e T5, iguais entre si, seguidos pelos tratamentos T6 e T1 (testemunha), superiores aos demais. No caso específico do solo arenoso, os maiores valores foram obtidos com o tratamento T10, seguido dos tratamentos T11 e T12, diferentes entre si, e do tratamento T7 (testemunha), todos superiores aos demais.

Aos 21 dias (Figura 65), o tratamento com “água-de-cola” e cal alcançou resultados significativos, sendo que, no caso específico do solo argiloso, o maior valor de CBR-Adaptado foi obtido com o tratamento T5, seguido do T4; os tratamentos T6 e a testemunha foram iguais entre si, e superiores aos tratamentos T3 e T2. No caso específico do solo arenoso tratado com 8% de “água-de-cola” em diversas concentrações, o maior valor de CBR-Adaptado foi obtido pelo tratamento T11, seguido pelos tratamentos T12 e T7 (testemunha), iguais entre si, e superiores aos demais.

Aos 60 dias (Figura 66), para o solo argiloso, o maior valor de CBR-Adaptado foi obtido pelo tratamento T4, seguido dos tratamentos T6 e T5, iguais entre si e superiores à testemunha (T1) e aos tratamentos T2 e T3, estes diferentes entre si. Com relação ao solo arenoso, os maiores valores de CBR-adaptado foram obtidos pelos tratamentos T12 e T11, seguidos de T10 e T7 (testemunha), iguais entre si e superiores aos tratamentos T8 e T9.

Aos 120 dias (Figura 67), para o solo argiloso, os maiores valores de CBR-Adaptado foram alcançados pelos tratamentos T4, T5 e T6, iguais entre si e superiores aos tratamentos T1 (testemunha), T2 e T3, também iguais entre si. Para o solo arenoso, os maiores valores de CBR-Adaptado foram obtidos pelos tratamentos T10 e T11, iguais entre si, seguidos do tratamento T12, e dos tratamentos T7 (testemunha), T8 e T9, iguais entre si.

O teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade estatística, mostrou que, de modo geral, o solo arenoso alcançou sempre maiores valores de CBR-Adaptado que o solo argiloso, independentemente das doses e concentrações de “água-de-cola” empregadas, bem como da época de penetração.

Com relação aos solos sem tratamento, penetrados unicamente aos 21 dias, os valores de CBR-Adaptado do solo arenoso foram superiores aos do solo argiloso; a mesma tendência foi observada com relação aos demais tratamentos.

No que diz respeito à época de penetração dos corpos-de-prova, o solo arenoso alcançou maiores valores de CBR-Adaptado que o solo argiloso, independentemente das doses e concentrações de “água-de-cola” empregadas.

Quanto ao tratamento com “água-de-cola” concentrada a 5%, os valores de CBR-Adaptado foram maiores no solo arenoso, exceção feita para a penetração aos 21 dias. Para o tratamento com “água-de-cola” concentrada a 10%, aos 21 dias, os solos arenoso e argiloso foram iguais entre si; nas demais épocas, o solo arenoso foi sempre superior ao argiloso.

No caso específico do solo tratado com 3% de cal, os solos argiloso e arenoso foram iguais entre si, aos 21 e 60 dias, enquanto que, aos 120 dias, o solo arenoso obteve valores de CBR-Adaptado superiores aos do solo argiloso.

Com relação aos solos adicionados de cal e tratados com “água-de-cola” concentrada a 5%, os solos arenoso e argiloso obtiveram resultados estatisticamente semelhantes aos 21 dias, enquanto que, aos 60 e 120 dias, o solo arenoso foi superior ao argiloso. No caso específico do solo tratado com “água-de-cola” concentrada a 10%, os valores de CBR-Adaptado foram sempre superiores no solo arenoso do que no argiloso, independentemente da época de penetração.

Com relação ao tempo de cura, para o tratamento do solo com “água-de-cola” concentrada a 5%, os maiores valores de CBR-Adaptado foram obtidos aos 60 e 120 dias, sem diferirem estatisticamente entre si, seguidos pelos valores referentes aos 21 dias. Para o tratamento com “água-de-cola” concentrada a 10%, os valores de capacidade de suporte não sofreram qualquer variação significativa em função do tempo de cura.

No caso específico dos solos tratados com 3% de cal, os maiores valores de CBR-Adaptado foram obtidos aos 120 dias de cura, seguidos dos 60 dias e 21 dias, estatisticamente diferentes entre si, indicando um aumento da capacidade de suporte com o decorrer do tempo de cura. Para os solos adicionados de cal e tratados com “água-de-cola” concentrada a 5%, os maiores valores de CBR-Adaptado foram obtidos aos 120 dias de cura, seguidos dos 60 e 21 dias, valores iguais entre si. Para os solos adicionados de cal e tratados com “água-de-cola” concentrada a 10%, os valores de suporte cresceram com o aumento do tempo de cura.

De um modo geral, os tratamentos com “água-de-cola”, independentemente da concentração utilizada, não obtiveram ganhos significativos de capacidade de suporte com o decorrer do tempo de cura.

#### **4 . 3 . 9 . Índices de suporte mini-CBR**

Os valores obtidos do ensaio mini-CBR, para o solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações, estão mostrados na Figura 70 e no Quadro 37, juntamente com as suas relações, enquanto que os valores referentes ao solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal, tratados com 8% de “água-de-cola” em diversas concentrações, estão mostrados na Figura 71, e, suas relações, no Quadro 38.

Como foi mencionado na metodologia, o ensaio mini-CBR foi realizado com o objetivo de obter o índice nas condições imerso e não imerso, na umidade próxima à da ótima; a correlação do CBR-DNER com o mini-CBR foi realizada por NOGAMI (1972).

A partir da análise do Quadro 37 e da Figura 70, constata-se que o solo argiloso (T1) apresentou uma relação igual a 82,89%. Segundo BERNUCCI (1995), para solos lateríticos, argilosos, a relação é superior a 50%, sendo em média igual a 75%.

Para o solo argiloso tratado com 15% de "água-de-cola" concentrada a 5% (T2), obteve-se uma relação de 77,78%, sendo, contudo, o índice mini-CBR inferior ao da testemunha. O mesmo aconteceu para a concentração de 10% (T3), cuja relação foi igual a 76,77%.

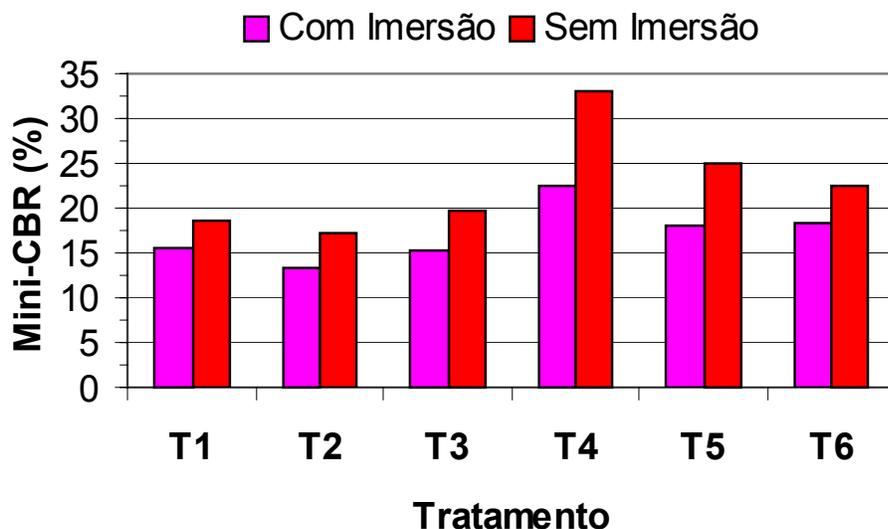
No caso específico do solo argiloso tratado com 3% de cal (T4), a relação foi igual a 67,88%, por outro lado, sendo o mini-CBR do tratamento T4 superior ao da testemunha (T1), pode-se afirmar que a cal conferiu ao solo condição de estabilidade superior, expressa através do maior valor de capacidade de suporte.

**QUADRO 37** – Comparação entre o índice mini-CBR com imersão e sem imersão para o solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal.

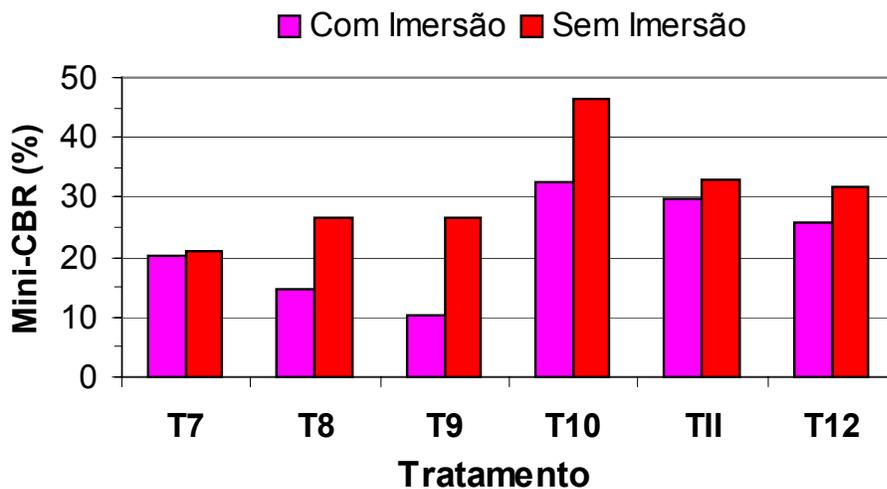
Condição	solo tratado com 15% de "água-de-cola" concentrada a			solo-cal tratado com 15% de "água-de-cola" concentrada a		
	0% (T1)	5% (T2)	10% (T3)	0% (T4)	5% (T5)	10% (T6)
Com Imersão	15,50	13,30	15,20	22,40	18,00	18,40
Sem Imersão	18,70	17,10	19,80	33,00	25,00	22,40
Relação (%)	82,89	77,78	76,77	67,88	72,00	82,14

**QUADRO 38** – Comparação entre o índice mini-CBR com imersão e sem imersão para o solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal.

Condição	solo tratado com 15% de "água-de-cola" concentrada a			solo-cal tratado com 15% de "água-de-cola" concentrada a		
	0% (T7)	5% (T8)	10% (T9)	0% (T10)	5% (T11)	10% (T12)
Com Imersão	20,40	14,50	10,30	32,40	29,80	25,90
Sem Imersão	21,10	26,40	26,40	46,30	33,00	31,70
Relação (%)	96,68	54,92	39,02	69,98	90,30	81,70



**FIGURA 70** – Comparação entre os valores de mini-CBR, com imersão e sem imersão, do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações.



**FIGURA 71** – Comparação entre dos valores de mini-CBR, com imersão e sem imersão, do solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal, tratados com 8% de “água-de-cola” em diversas concentrações.

Para o solo argiloso adicionado de cal e tratado com 15% de "água-de-cola" concentrada a 5% (T5), a relação foi de 72,00%, valor inferior ao do tratamento T4, porém, superior ao da testemunha (T1). Com a concentração de 10% (T6), a relação aumentou para 82,00%, permanecendo as mesmas condições do tratamento T5.

No caso específico do solo arenoso (T7), a relação do mini-CBR, obtido com imersão e sem imersão, foi de 96,68%, e seu índice, 20,40%. Este valor está inserido na faixa trabalhada por BERNUCCI (1995), sendo bem superior ao valor proposto por VILLIBOR (1981), que é 50%.

Com o solo arenoso tratado com 8% de "água-de-cola" concentrada a 5% (T8), a relação caiu para 54,92% e, para a concentração de 10%, 39,02%; assim como os seus índices, esses valores foram inferiores aos do solo natural (T7), com imersão. Contudo, sem imersão, os índices mini-CBR, para ambos os tratamentos (T8 e T9), foram superiores aos da testemunha (T7), evidenciando-se assim a perda de capacidade nos tratamentos com polímero quando incluírem imersão em água.

A relação para o solo arenoso adicionado de cal foi de 69,98%, semelhante à do solo argiloso, sendo, no entanto, seu índice mini-CBR bem superior, assim como para a condição não imersa. No caso específico do solo arenoso adicionado de cal e tratado com 8% de "água-de-cola" concentrada a 5% (T11), a maior relação obtida foi 90,30%; seu índice mini-CBR, todavia, foi inferior ao do tratamento T10 e superior à testemunha (T7). Para a concentração de 10%, a relação também foi elevada, ficando o índice mini-CBR aproximadamente igual ao do tratamento anterior.

#### 4 . 3 . 10 . Módulo de resiliência para o solo argiloso

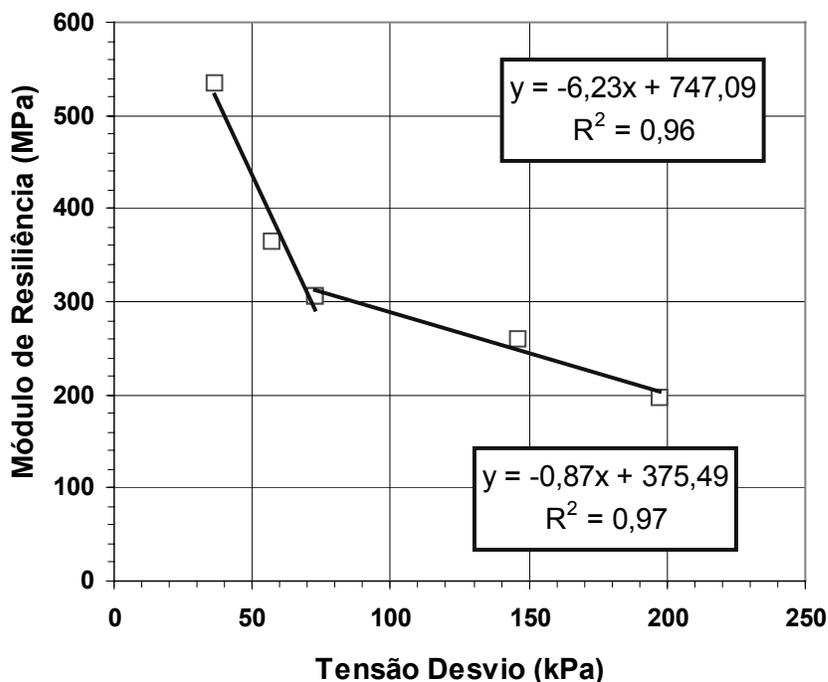
Os resultados do ensaio do módulo de resiliência em função da tensão desvio, para corpos-de-prova do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações, são apresentados na forma de gráficos, ajustados de acordo com o modelo bilinear proposto por MEDINA (1997), em escala aritmética, como mostrado na Figura 27. São discutidos os dados do ensaio, comparando-os com resultados semelhantes quando existentes; os valores modulares determinados, constituem dados de entrada para o programa ELSYM5, através do qual se realizou o cálculo das tensões e deformações das camadas do pavimento, juntamente com suas respectivas espessuras.

Os resultados da determinação do módulo de resiliência em função da tensão desvio, para o solo argiloso, estão mostrados na Figura 72; para o solo argiloso tratado com “água-de-cola” concentrada a 5%, os resultados estão mostrados na Figura 73; na Figura 74, os resultados correspondentes à concentração de 10%. No caso do solo argiloso adicionado de cal, os resultados estão mostrados na Figura 75; para o solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola” a 5%, na Figura 76; para a concentração de 10%, na Figura 77. O resumo dos parâmetros do módulo de resiliência dos seis tratamentos, aplicados ao solo argiloso, está apresentado no Quadro 39.

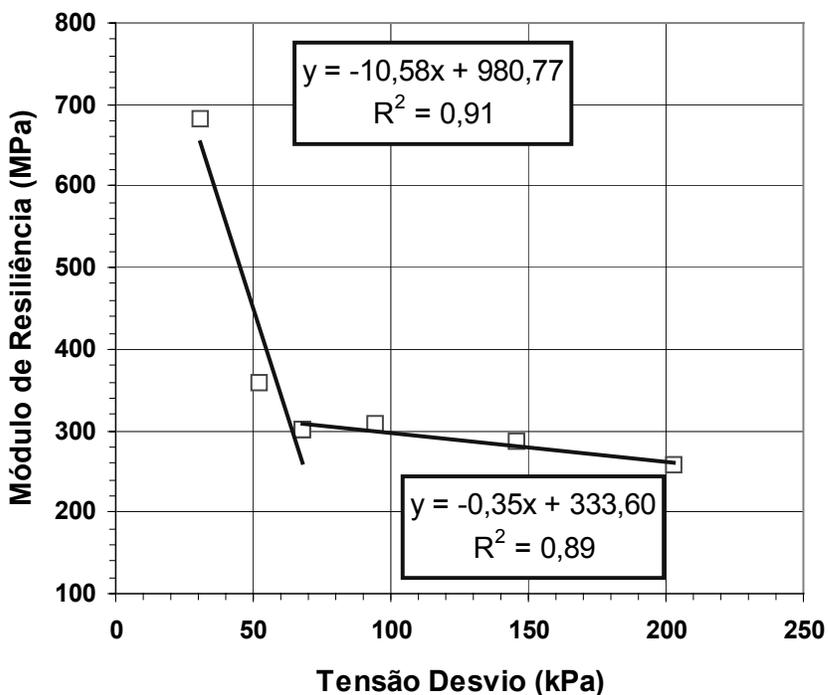
A partir da análise da curva granulométrica aplicada ao solo argiloso (Figura 11), sabe-se que a porcentagem de finos é 70% e a porcentagem de silte, nos finos, de 26%. De acordo com a classificação resiliente de solos (PREUSSLER e PINTO, 1983; e DNER, 1996), o solo argiloso se enquadra na classe de solos finos, tendo o comportamento do módulo resiliente dependente da tensão desvio e representado pelo modelo bilinear. Os parâmetros determinados foram:  $k_1 = 69,33$ , em kPa; e  $k_2 = 315,23$ , em MPa, resultando nas equações:

$$M_r = 315,23 + 6,23 (69,33 - \sigma_d)$$

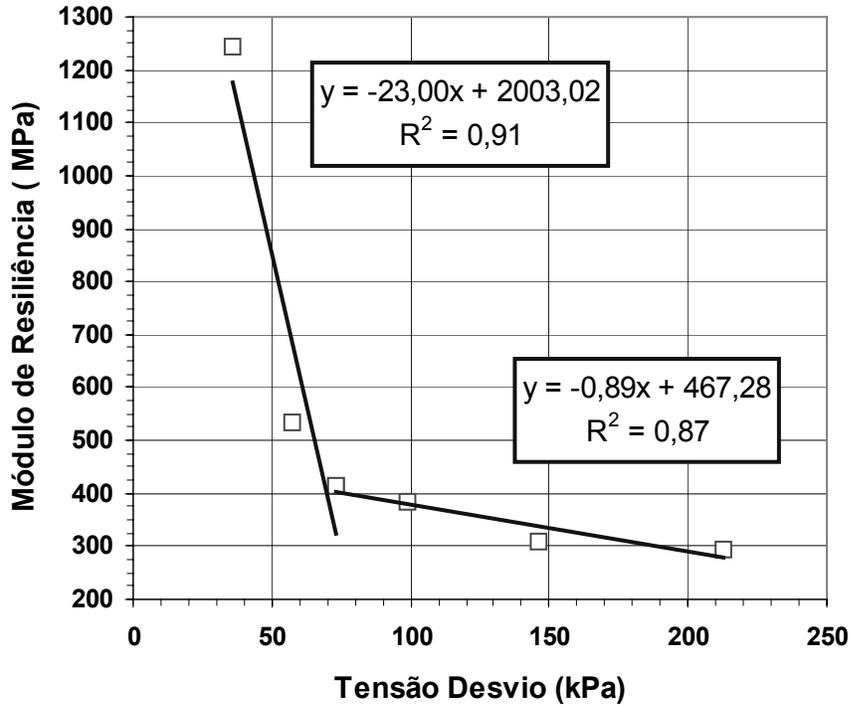
$$M_r = 315,23 + 0,87 (\sigma_d - 69,33).$$



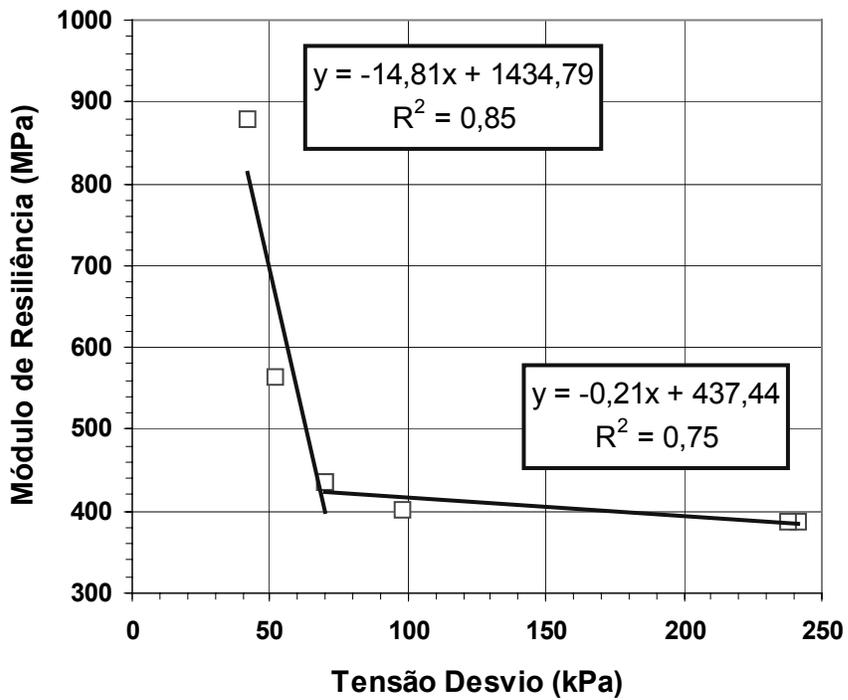
**FIGURA 72** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso.



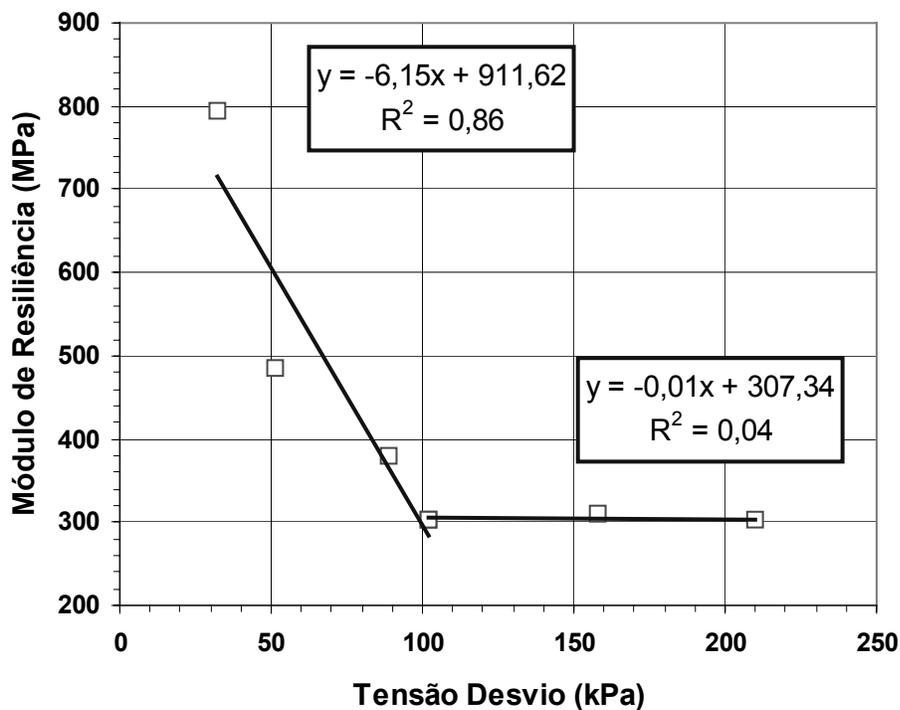
**FIGURA 73** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso tratado com 15% de "água-de-cola" a 5% de concentração.



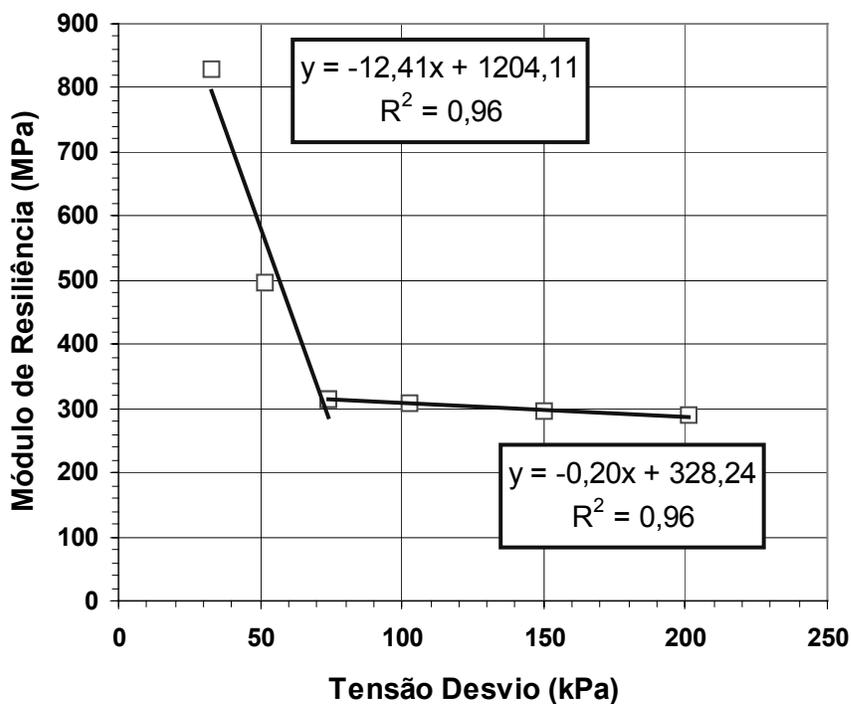
**FIGURA 74** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso tratado com 15% de "água-de-cola" a 10% de concentração.



**FIGURA 75** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso adicionado de cal.



**FIGURA 76** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso adicionado de cal e tratado com 15% de "água-de-cola" a 5% de concentração.



**FIGURA 77** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão desvio para o solo argiloso adicionado de cal e tratado com 15% de "água-de-cola" a 10% de concentração.

**QUADRO 39** – Resumo dos parâmetros do módulo de resiliência do solo argiloso.

Trat	GC (%)	Umidade (%)		K <sub>1</sub> (kPa)	K <sub>2</sub> (MPa)	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	R <sup>2</sup>
		Ótima	Após o ensaio					
T1		21,50	20,86	69,33	315,23	6,23	0,87	0,96 0,97
T2	99,73	21,50	20,68	63,29	311,17	10,58	0,35	0,91 0,89
T3	99,65	21,50	19,19	69,49	405,42	22,99	0,89	0,91 0,87
T4	99,49	22,60	20,66	68,36	422,87	14,81	14,81	0,85 0,75
T5	99,53	22,60	19,98	100,71	305,83	6,15	0,01	0,86 0,04
T6	99,62	22,60	19,38	71,74	317,72	12,41	0,20	0,96 0,96

Trat - Tratamento  
GC - Grau de compactação  
K<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub>, k<sub>4</sub> - Parâmetros de resiliência do solo argiloso  
R<sup>2</sup> - Coeficiente de determinação

A partir dos parâmetros obtidos, e considerando-se que o valor do índice CBR é maior que 10%, pode-se classificar o solo como Tipo I. De acordo com o DNER (1996), o solo argiloso é um solo de bom comportamento quanto à resiliência, podendo ser utilizado como camada de sub-leito, reforço do sub-leito e sub-base; dentro das possibilidades de utilização apresentadas pelo DNER (1996), o solo argiloso não se presta como componente de base de estradas.

O teor de umidade dos corpos-de-prova, logo após o ensaio, foi ligeiramente inferior ao da ótima de compactação, muito embora os corpos-de-prova tenham ficado expostos às condições ambientais antes e durante a preparação e montagem na câmara triaxial; à época do ensaio, era inverno e a umidade relativa do ar era baixa.

No primeiro tramo da reta, para a tensão desvio de 36 kPa, o módulo de resiliência foi de 534,13 MPa, e a equação de regressão ajustada apresentou um coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 0,96. No segundo, para a tensão desvio de 197 kPa, resultou um módulo igual a 197,00 MPa e um coeficiente de determinação de 0,86 para a reta de regressão. Os resultados encontrados mostram a dependência do módulo de resiliência em relação à tensão desvio.

De acordo com a gama de dados obtidos por MOTA *et al.* (1985), para pavimentos de baixo custo, os parâmetros aqui encontrados para o solo argiloso (LG') são satisfatórios, assim como os módulos obtidos de bacias com FWD (Falling Weight Deflectometer), relatados por ALVAREZ NETO (1998).

Para o solo argiloso tratado com 15% de “água-de-cola” concentrada a 5%, o módulo de resiliência se ajustou ao modelo bilinear, proposto para solos coesivos (Figura 73). Com relação aos parâmetros do ensaio, o teor de umidade do corpo-de-prova tomado logo após o ensaio, à semelhança do solo natural, foi ligeiramente inferior ao ótimo de compactação.

Os parâmetros de ajuste (Quadro 39),  $k_1$  e  $k_2$ , comparados aos do solo argiloso, foram ligeiramente inferiores; o inverso aconteceu com  $k_3$  e  $k_4$ , proporcionando maiores inclinações da reta. No tramo inicial da reta, para a tensão desvio de 31 kPa, o módulo de resiliência foi igual a 683,36 MPa, e a reta de regressão apresentou um coeficiente de determinação de 0,91. No tramo final, para a tensão desvio de 203 kPa, o valor do módulo foi igual a 257 MPa. Os valores modulares obtidos foram superiores aos do solo argiloso, significando dizer que o solo tratado permaneceu com as mesmas características do solo Tipo I (DNER, 1996).

No caso do solo argiloso tratado com “água-de-cola” a 10% de concentração, ensaiado sob uma tensão de confinamento de 0,21 kPa, o módulo de resiliência tomado em função da tensão desvio e ajustado ao modelo bilinear, resultou em coeficientes de determinação de 0,91 e de 0,87, para o primeiro e segundo tramos da reta, respectivamente, mostrando que houve uma boa associação dos pontos obtidos nos dois segmentos de reta. Com respeito ao teor de umidade do ensaio, observou-se a mesma tendência anterior, sendo o grau de compactação igual a 99,65%.

Verificou-se que, para tensões-desvio menores do que 69,49 kPa, o módulo de resiliência foi fortemente dependente da tensão desvio, enquanto que, para valores superiores a  $k_1$ , essa dependência foi menor. No caso especial das tensões-desvio de 36 e 213 kPa, os valores dos módulos de resiliência foram de 1243,99 e 293 MPa, respectivamente, praticamente o dobro dos encontrados para o solo argiloso natural, como indica  $k_3$ ; todavia, no segundo tramo da reta, os valores são praticamente semelhantes. A partir dos valores obtidos e analisados, pode-se afirmar que o tratamento com “água-de-cola” correspondeu aos requisitos que permitem classificá-lo como sendo equivalente ao do solo Tipo I.

No caso do solo argiloso tratado com 3% de cal, o valor do módulo de resiliência, obtido para uma tensão de confinamento de 21 kPa e tensão desvio aplicada de 42 kPa, ajustado ao modelo proposto para solos coesivos, foi igual a 878 MPa (valor superior ao obtido com o solo argiloso natural); no primeiro tramo da reta ajustada,  $R^2$  foi igual a 0,85, mostrando uma forte inclinação ( $k_3 = 14,81$ ), levando a considerar que, para uma pequena variação de tensão desvio, resulta uma grande variação no valor do módulo; quanto a  $k_1$ , seu valor foi praticamente semelhante ao do solo natural. No segundo tramo, mesmo com valores de módulo de resiliência superiores ao do solo natural, praticamente não houve variação com o acréscimo da tensão desvio, mostrando que, para valores maiores que  $k_1$ , o módulo não foi dependente da tensão desvio ( $k_4 = 0,21$ ); a reta de regressão apresentou coeficiente de determinação igual a 0,75. Contudo, o acréscimo de 3%

de cal ao solo argiloso resultou, para tensões-desvio maiores que  $k_1$ , praticamente o dobro do valor do módulo de resiliência em relação ao solo natural.

No caso do solo argiloso adicionado de cal tratado com 15% de “água-de-cola” concentrada a 5%, os valores obtidos do ensaio, ajustados ao modelo bilinear, apresentaram um coeficiente de determinação praticamente igual ao do solo argiloso adicionado de cal (tramo 1);  $k_1$  alcançou o maior valor (100,71 kPa), e  $k_2$ , o menor valor de módulo; no tramo 2, a reta ajustada tornou-se horizontal ( $R^2$  igual a 0,04). Uma particularidade observada é que, para valores de  $\sigma_d < k_1$ , os valores modulares foram elevados, enquanto que para  $\sigma_d > k_1$ , o valor do módulo foi constante, não sendo função da tensão desvio.

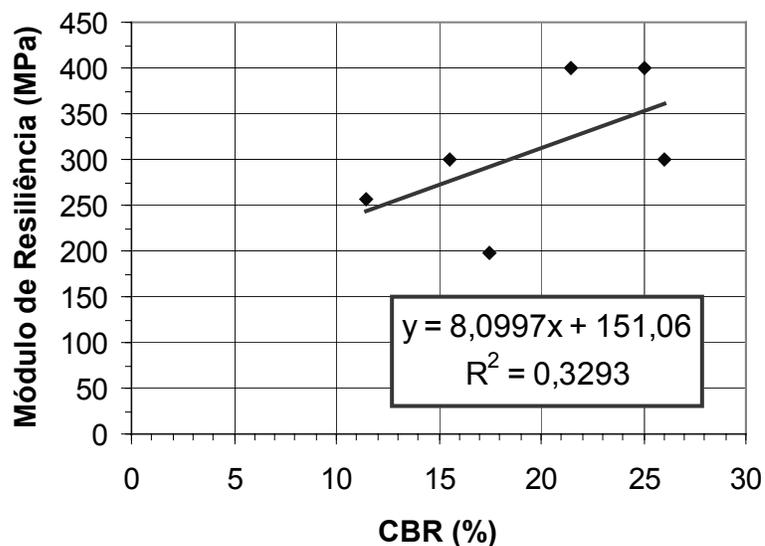
Para o solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola” concentrada a 10%, o comportamento do módulo resiliente, em função da tensão desvio, foi praticamente semelhante ao do solo argiloso apenas adicionado de cal.

Alguns outros aspectos devem ser considerados, como a energia de compactação que, para todos os corpos-de-prova, foi a equivalente à do Proctor normal, sendo o valor do módulo de resiliência crescente com a energia de compactação (BERNUCCI, 1995; MEDINA e PREUSSLER, 1980) valores superiores aos obtidos poderiam ser alcançados caso se aumentasse a energia de compactação.

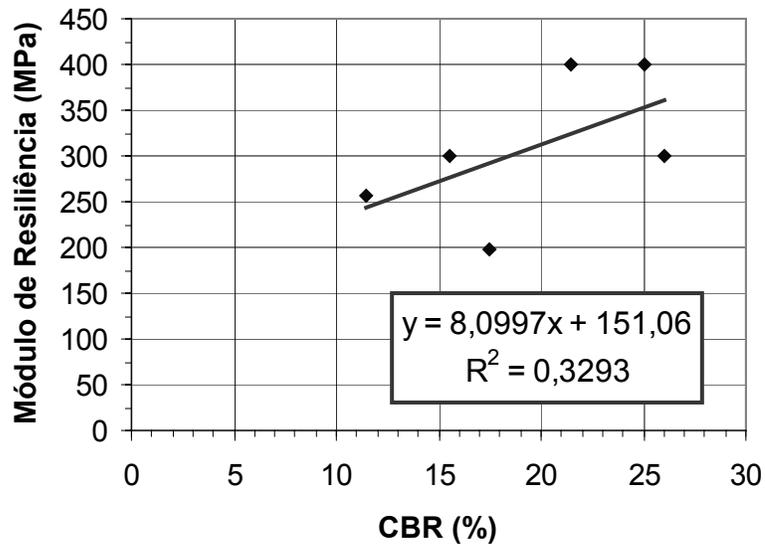
### **Correlação entre o CBR e o módulo de resiliência**

Na Figura 78 estão apresentadas as regressões lineares entre o CBR-Adaptado e o módulo de resiliência do solo argiloso e do solo argiloso adicionado de cal e tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações, bem como os coeficientes de determinação obtidos; a correlação entre o mini-CBR e o módulo de resiliência está mostrada na Figura 79.

Por ser o índice CBR de fácil determinação, muitos autores buscaram correlacioná-lo com o módulo de resiliência, tais como BERNUCCI (1995), MEDINA E PREUSSLER (1980) e VISSER *et al.* (1983), muito embora com relação à deformação, todos eles apresentassem ressalvas. Por isso, procurou-se estabelecer uma correlação dos índices CBR-Adaptado com os módulos de resiliência obtidos de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionados de cal, tratados com 15% de “água-de-cola”; tais procedimentos foram também estendidos ao mini-CBR, tendo em vista que os corpos-de-prova também foram confeccionados da mesma maneira. Para o módulo, foram adotados os valores, correspondentes à aplicação da tensão desvio de 200 kPa, conforme MEDINA e PREUSSLER (1980).



**FIGURA 78** - Correlação entre o CBR-Adaptado e o Módulo de Resiliência, para o solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações.



**FIGURA 79** - Correlação entre o Mini-CBR e o Módulo de Resiliência, para o solo argiloso e solo argiloso adicionados de cal, tratado em 15% de “água-de-cola” em diversas concentrações.

Em ambas as correlações, a reta de regressão apresentou valores de coeficientes de determinação razoáveis, sem, no entanto, poder compará-los com outros similares, por tratar-se de um número reduzido de pontos, de materiais incorporados com aditivos, além da própria dispersão de dados ocorrida. As correlações citadas foram feitas para solos sem adição, apresentando, assim mesmo, uma grande variabilidade.

#### 4 . 3 . 11 . Módulo de resiliência para o solo arenoso

Os resultados do ensaio do módulo de resiliência em função da tensão de confinamento, para o solo arenoso, estão mostrados na Figura 80, enquanto que, no Quadro 40, estão apresentados os principais parâmetros do ensaio; para o solo tratado com 15% de “água-de-cola” concentrada a 5%, os resultados

correspondentes estão apresentados na Figura 81 e Quadro 41, e, para a concentração de 10%, na Figura 82 e Quadro 42. Para o solo arenoso tratado apenas com cal, os resultados são mostrados na Figura 83, estando os principais parâmetros do ensaio registrados no Quadro 43; para o solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola” concentrada a 5%, os resultados correspondentes estão mostrados na Figura 84 e no Quadro 44, e, para a concentração de 10%, na Figura 85 e Quadro 45.

Baseado nas características granulométricas do solo arenoso (Figura 11), tem-se que a porcentagem de material que passa na peneira nº 200, é 29% (inferior a 35%), o que, de acordo com a classificação resiliente (DNER, 1996), leva a classificar o solo arenoso como sendo granular, ajustando-se os valores do módulo de resiliência ao modelo mostrado na Figura 28, delineado em função da tensão de confinamento.

Quanto ao ensaio, o corpo-de-prova apresentou grau de compactação de 100%, e seu teor de umidade, após o ensaio, foi praticamente o mesmo de moldagem; no presente caso, o corpo-de-prova apresentou a maior deformação.

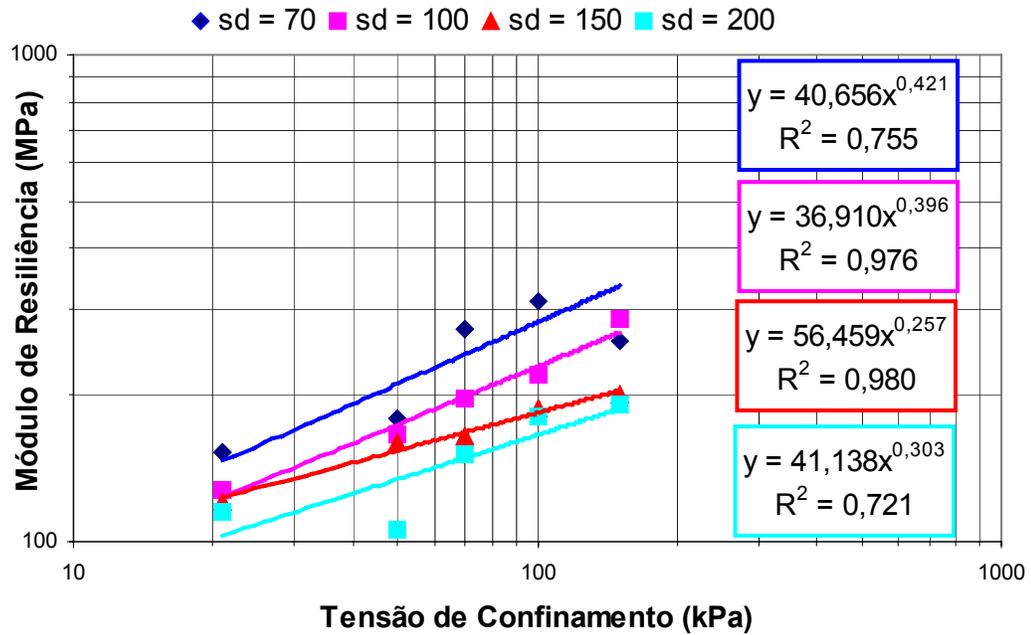
Para a reta de regressão determinada para a tensão desvio de 70 kPa, obteve-se  $k_2$  igual a 0,42, ou seja menor que 0,50, o que, de acordo com a classificação resiliente, enquadra o solo no Grupo B, com grau de resiliência intermediário, podendo ser empregado em todas as camadas do pavimento. O mesmo comportamento também foi observado para as tensões-desvio de 100 e 150 kPa. Quanto ao ajuste dos pontos ao modelo proposto, praticamente em todos os casos o coeficiente de determinação foi satisfatório, mostrando uma boa associação entre os pontos. Alguns pontos (Figura 80) apresentaram-se fora do ajuste, atribuindo-se tal fato ao sistema de leitura das deformações, ao sistema de aquisição de dados, assim como ao próprio sistema pneumático do equipamento.

Para o solo arenoso tratado com 8% de “água-de-cola” concentrada a 5%, o teor de umidade, após o ensaio, apresentou perda de aproximadamente 1%, sendo o grau de compactação igual a 99,24%. Os valores do módulo de resiliência foram superiores aos obtidos para o solo natural, praticamente para todas as tensões-desvio aplicadas.

No caso especial da tensão desvio aplicada de 70 kPa, o módulo de resiliência variou de 300 a 400 MPa. Tendo em vista que o solo natural sofreu uma deformação excessiva, não se pode creditar o aumento do valor do módulo unicamente ao tratamento aplicado ao solo, muito embora o solo tratado possa ser enquadrado como pertencente ao Grupo C, da classificação resiliente, podendo ser utilizado em todas as camadas do pavimento.

Para o solo arenoso tratado com 8% de “água-de-cola” concentrada a 10%, o teor de umidade do corpo-de-prova apresentou uma variação de 1,1%, enquanto o seu grau de compactação foi de 98,82%. Os valores do módulo de resiliência foram inferiores aos do tratamento anterior, embora superiores aos obtidos para o solo natural. O coeficiente  $k_2$  foi inferior a 0,1, exceção feita ao obtido com a aplicação da tensão desvio de 70 kPa, que foi 0,12. Para as tensões-desvio de 150 e 200 kPa, os módulos foram praticamente semelhantes.

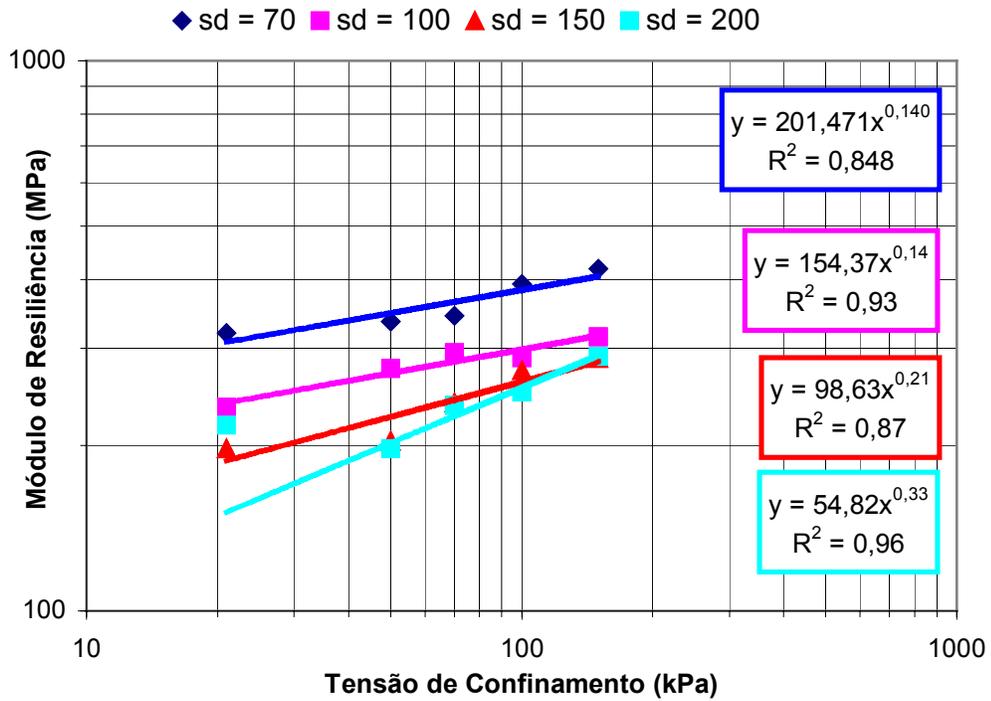
No caso específico do solo arenoso tratado unicamente com 3% de cal, a variação do teor de umidade também foi de 1%, sendo igual a 99,12% o seu grau de compactação. Comparando os valores dos módulos de resiliência obtidos com os do solo natural, verificou-se que, para o parâmetro  $k_1$ , os valores foram todos superiores, sendo contudo a variação dos coeficientes de determinação praticamente semelhante.



**FIGURA 80** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso.

**QUADRO 40** - Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso.

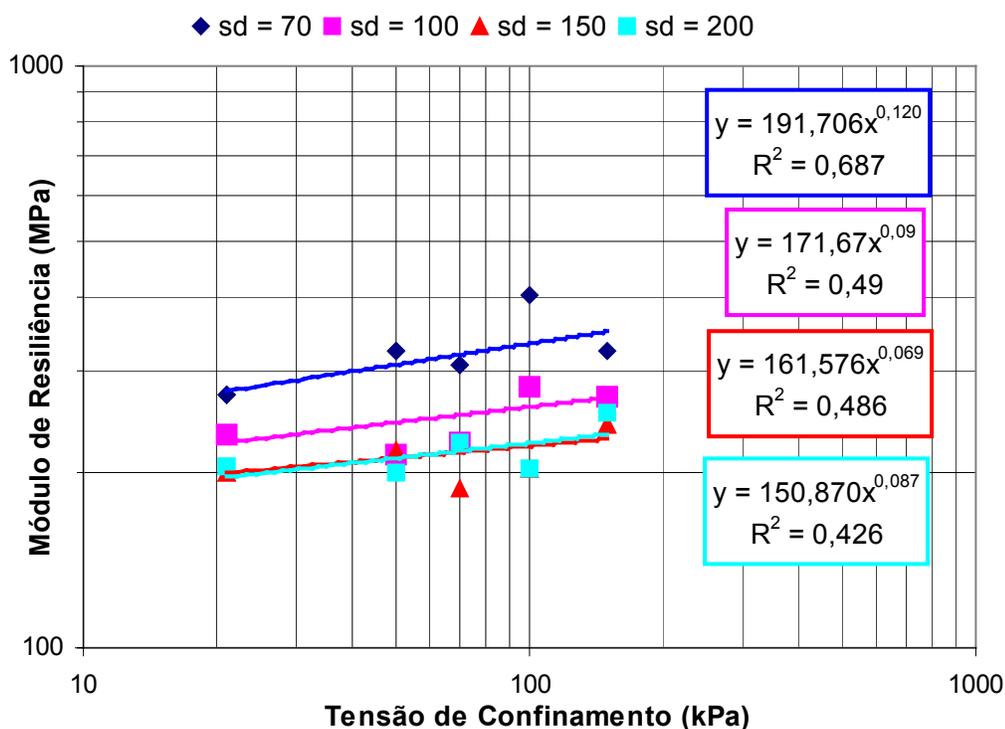
Tensão desvio (kPa)	Umidade (%)		GC (%)	Parâmetros		R <sup>2</sup>
	Ótima	Após o ensaio		K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	
70	9,72	9,50	100	201,47	0,139	0,848
100				154,37	0,143	0,929
150				98,63	0,210	0,866
200				54,82	0,330	0,925



**FIGURA 81** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso tratado com 8% de "água-de-cola" a 5% de concentração.

**QUADRO 41** – Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso tratado com 8% de "água-de-cola" a 5% de concentração.

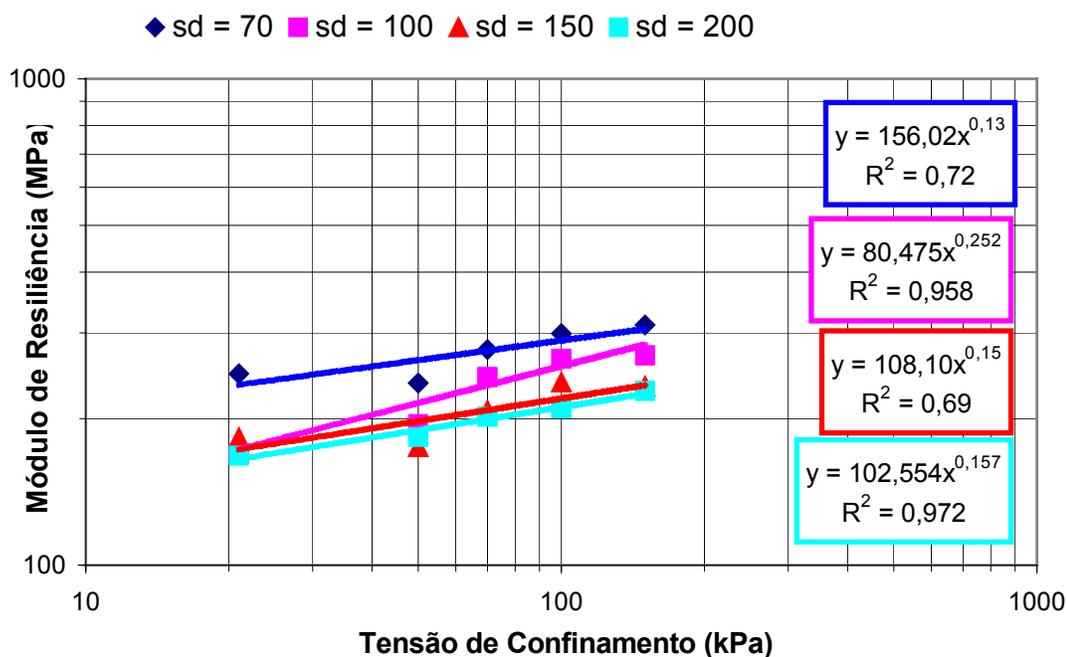
Tensão desvio (kPa)	Umidade (%)		GC (%)	Parâmetros		R <sup>2</sup>
	Ótima	Após o ensaio		K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	
70	9,72	9,50	99,24	201,47	0,139	0,85
100				154,37	0,143	0,93
150				98,63	0,210	0,87
200				54,82	0,333	0,93



**FIGURA 82** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso tratado com 8% de "água-de-cola" a 10% de concentração.

**QUADRO 42** – Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso tratado com 8% de "água-de-cola" a 10% de concentração.

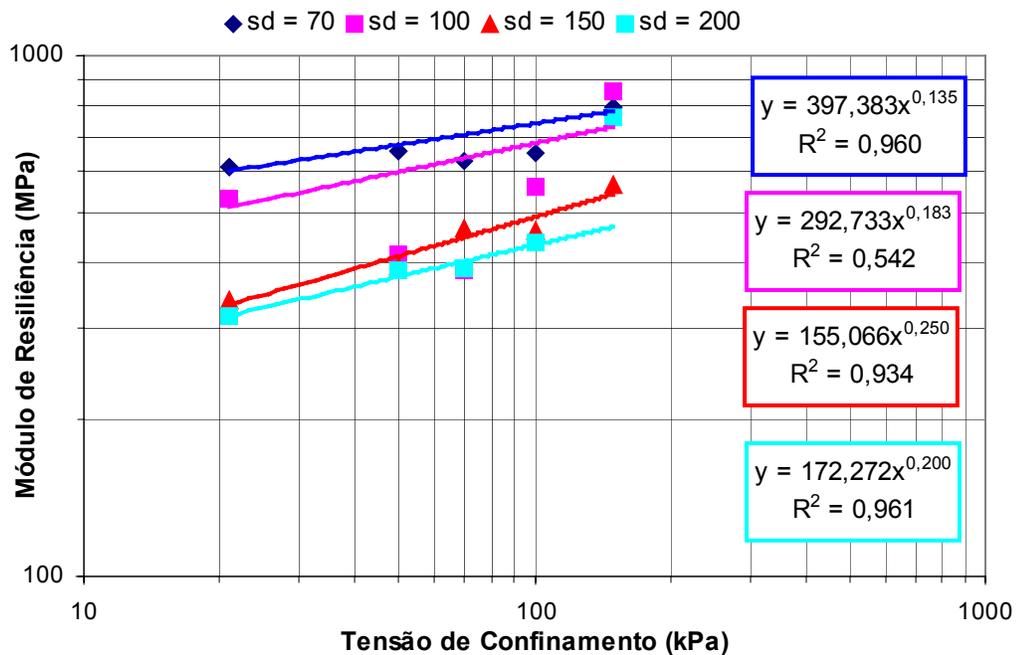
Tensão desvio (kPa)	Umidade (%)		GC (%)	Parâmetros		R <sup>2</sup>
	Ótima	Após o ensaio		K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	
70	10,10	9,91	98,82	191,71	0,12	0,69
100				171,71	0,09	0,49
150				161,58	0,07	0,49
200				150,87	0,09	0,43



**FIGURA 83** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso tratado com 3% de cal.

**QUADRO 43** – Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso tratado com 3% de cal.

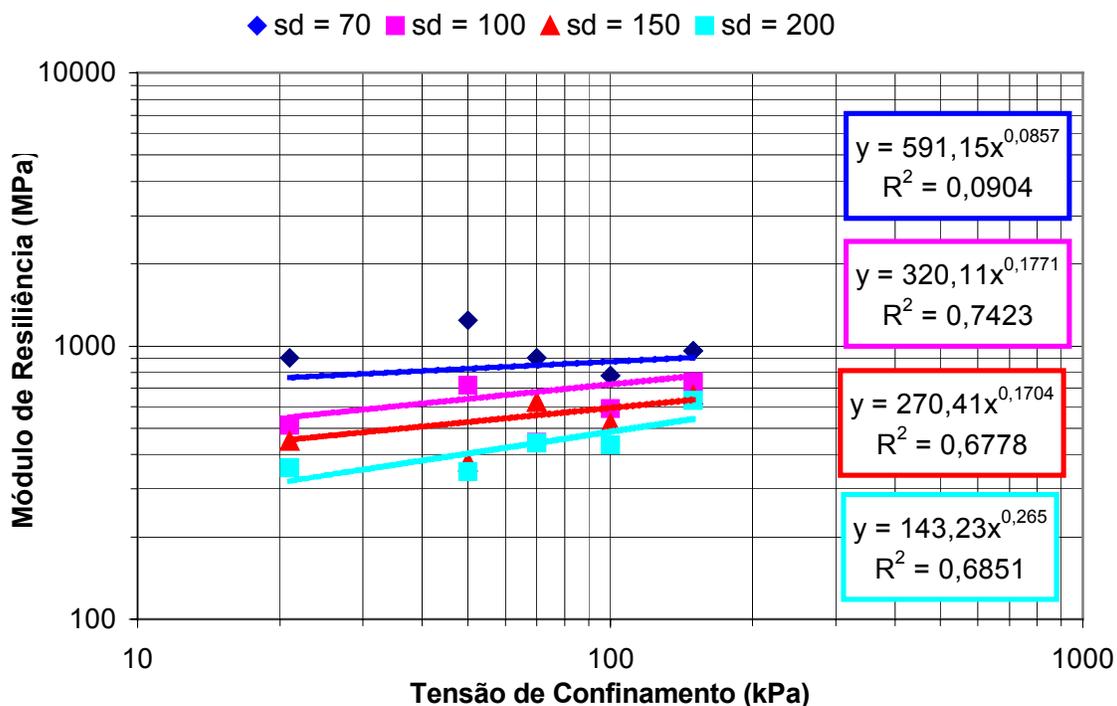
Tensão desvio (kPa)	Umidade (%)		GC (%)	Parâmetros		R <sup>2</sup>
	Ótima	Após o ensaio		K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	
70	11,20	10,01	99,12	156,02	0,134	0,72
100				80,47	0,252	0,96
150				108,10	0,154	0,69
200				102,55	0,157	0,97



**FIGURA 84** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso adicionado de cal e tratado com 8% de "água-de-cola" a 5% de concentração.

**QUADRO 44** – Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso adicionado de cal e tratado com 8% de "água-de-cola" a 5% de concentração.

Tensão desvio (kPa)	Umidade (%)		GC (%)	Parâmetros		R <sup>2</sup>
	Ótima	Após o ensaio		K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	
70	11,20	10,01	96,52	397,38	0,134	0,96
100				292,73	0,183	0,54
150				155,07	0,250	0,93
200				172,27	0,200	0,96



**FIGURA 85** - Diagrama do módulo resiliente em função da tensão confinante para o solo arenoso adicionado de cal e tratado com 8% de "água-de-cola" a 10% de concentração.

**QUADRO 45** – Principais parâmetros do ensaio do módulo de resiliência para o solo arenoso adicionado de cal e tratado com 8% de "água-de-cola" a 10% de concentração.

Tensão desvio (kPa)	Umidade (%)		GC (%)	Parâmetros		R <sup>2</sup>
	Ótima	Após o ensaio		K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	
70	11,85	10,10	99,34	591,15	0,086	0,09
100				320,11	0,177	0,74
150				270,41	0,170	0,68
200				143,23	0,265	0,69

Para o solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola” concentrada a 5%, a variação do teor de umidade foi a mesma, sendo o grau de compactação igual a 96,52%. A incorporação do resíduo à mistura solo-cal aumentou significativamente os valores do módulo de resiliência, em função da tensão confinante, principalmente para as tensões-desvio de 70 e 100 kPa, apresentando variações modulares de 500 a 800 MPa; para tensões-desvio de 150 e 200 kPa, as retas ajustadas foram praticamente paralelas, com módulos apresentando valores elevados. O ajuste das curvas foi satisfatório, salvo no caso da tensão-desvio de 100 kPa. De maneira geral, os módulos de resiliência obtidos foram bem superiores àqueles do solo arenoso adicionado de cal.

No caso do solo arenoso adicionado de cal e tratado com o resíduo concentrado a 10%, a variação do teor de umidade foi de 2%, a maior de todas, e o grau de compactação equivalente ao anterior. Quanto aos valores obtidos para o módulo de resiliência, estes foram os mais elevados, em relação ao solo tratado unicamente com cal e para a concentração de 5%. Observa-se que, para a tensão de 70 kPa, foi constatado um valor isolado de módulo, não contido no ajuste, superior a 1000 MPa; valores elevados também foram obtidos para as demais tensões. Para a tensão desvio de 70 kPa, a reta de regressão ajustada se aproxima da horizontal, e o coeficiente de determinação, de zero.

Pelo fato deste tratamento apresentar os maiores módulos de resiliência, pode-se inferir que, se usado em camada de pavimento, ocorreriam baixas deflexões, podendo, então, ser recomendado para uso em quaisquer uma das camadas.

#### **4 . 3 . 12 . Ensaio de durabilidade através de ciclos alternados de molhamento e secagem**

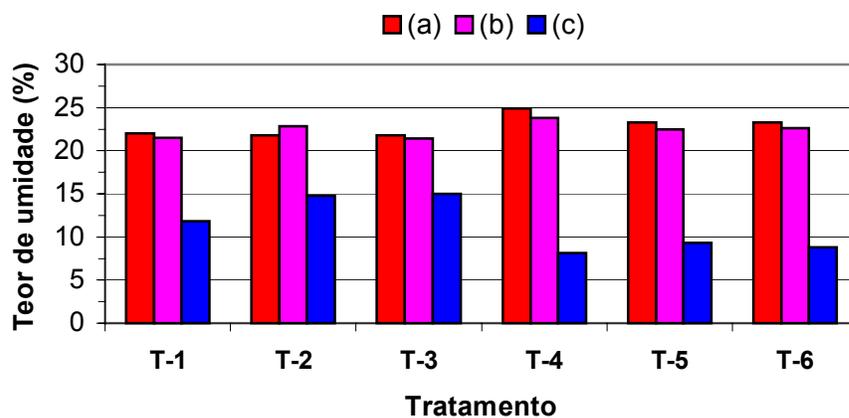
##### **Umidade dos corpos-de-prova**

Os valores dos teores de umidade de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com “água-de-cola”, determinados (a) por ocasião da moldagem, (b) antes do ensaio de tração e após cura em câmara úmida, e (c) após serem submetidos aos vários ciclos de molhamento e secagem do ensaio de durabilidade, estão mostrados na Figura 86; os valores correspondentes ao solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal e tratados com “água-de-cola” concentrada, estão apresentados na Figura 87.

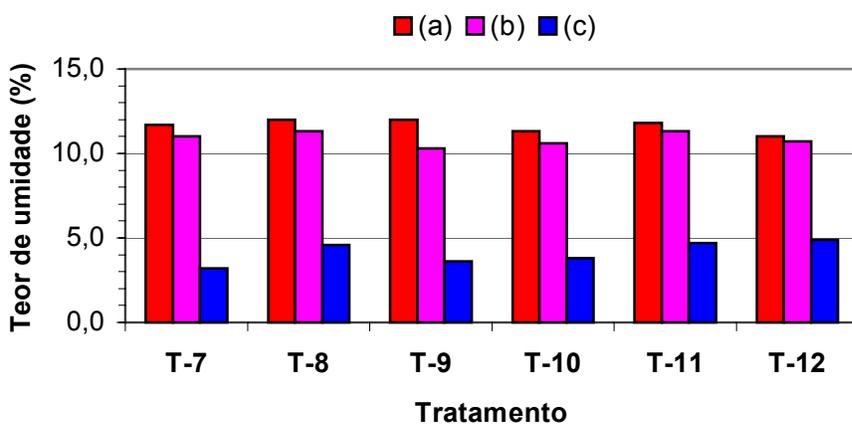
No caso do solo argiloso (Figura 86), os teores de umidade apresentados pelos corpos-de-prova na moldagem e logo após o período de cura, foram ligeiramente semelhantes, indicando um bom condicionamento dos corpos-de-prova; para os tratamentos com “água-de-cola” (tratamentos T2 e T3), observou-se que estes absorveram mais água que o solo natural, após a aplicação dos ciclos de molhamento e secagem. No caso do solo arenoso (Figura 87), os teores de umidade dos corpos-de-prova na moldagem foram ligeiramente superiores aos acondicionados em câmara úmida, constatando-se, também, que, para os tratamentos T7, T8 e T9, os teores de umidade dos corpos-de-prova, determinados após a moldagem, foram superiores ao ótimo do ensaio de compactação. Com relação aos teores de umidade dos corpos-de-prova de solo argiloso, durante o ensaio de durabilidade, estão os mesmos mostrados na Figura 88; na Figura 89, estão os valores correspondentes ao solo arenoso.

Para os corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratados com “água-de-cola” (Figura 86), não se observou grandes variações dos teores de umidade durante o ensaio dos corpos-de-prova; foram constatados trincamento e erosão devido a uma aparente descompactação, fazendo com que o conjunto, corpo-de-prova e a parte desagregada, passasse a apresentar maior

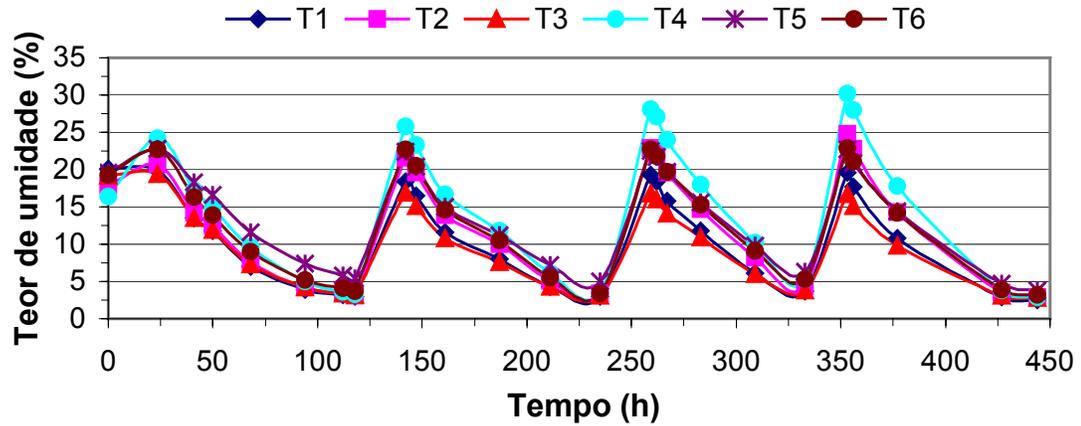
teor de umidade. No caso do solo arenoso, os tratamentos T10, T11 e T12, não mostraram grandes variações.



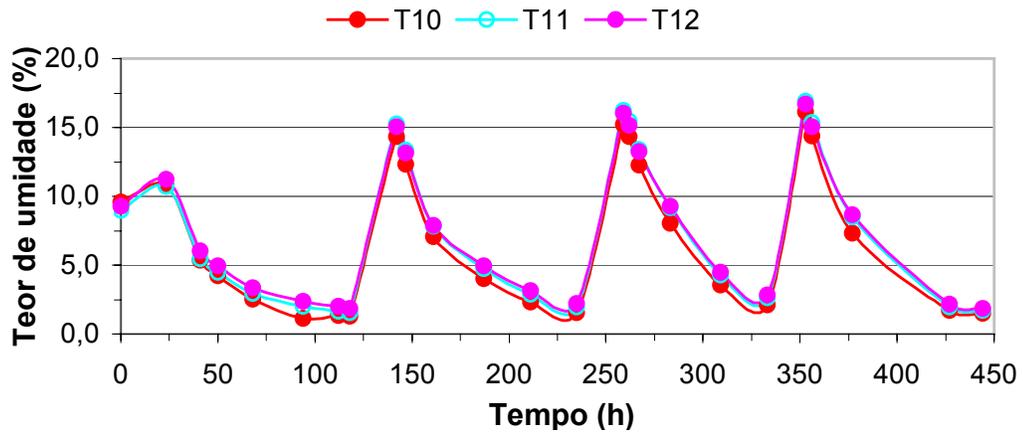
**FIGURA 86** – Teores de umidade de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com “água-de-cola”, determinados por ocasião da moldagem (a), após 21 dias de câmara úmida (b), e antes e após os ciclos de molhamento e secagem (c).



**FIGURA 87** – Teores de umidade de corpos-de-prova de solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal, tratados com “água-de-cola”, determinados por ocasião da moldagem (a), após 21 dias de câmara úmida (b), e antes e após os ciclos de molhamento e secagem (c).



**FIGURA 88** – Teores de umidade do solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com “água-de-cola”, durante os ciclos de molhamento e secagem.



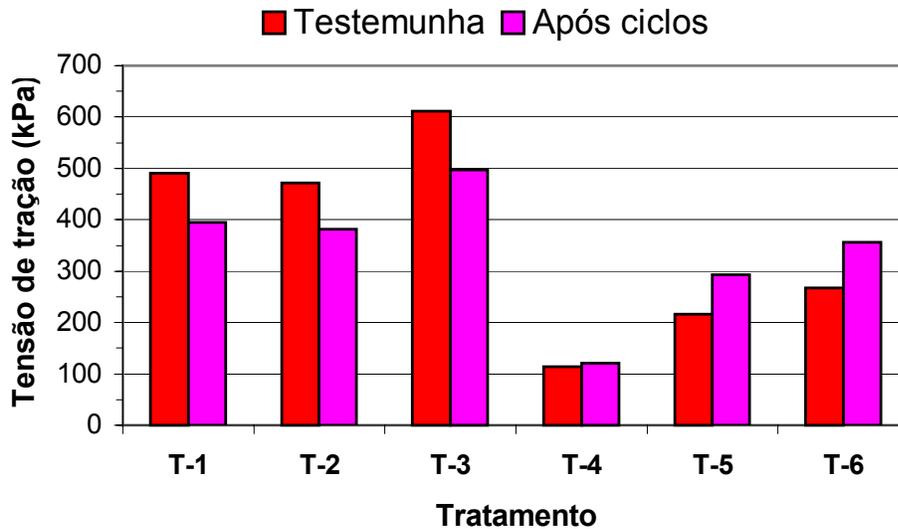
**FIGURA 89** – Teores de umidade do solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante os ciclos de molhamento e secagem.

## **Relação entre a resistência à tração de corpos-de-prova, após a aplicação de ciclos alternados de molhamento e secagem, e cura em câmara úmida**

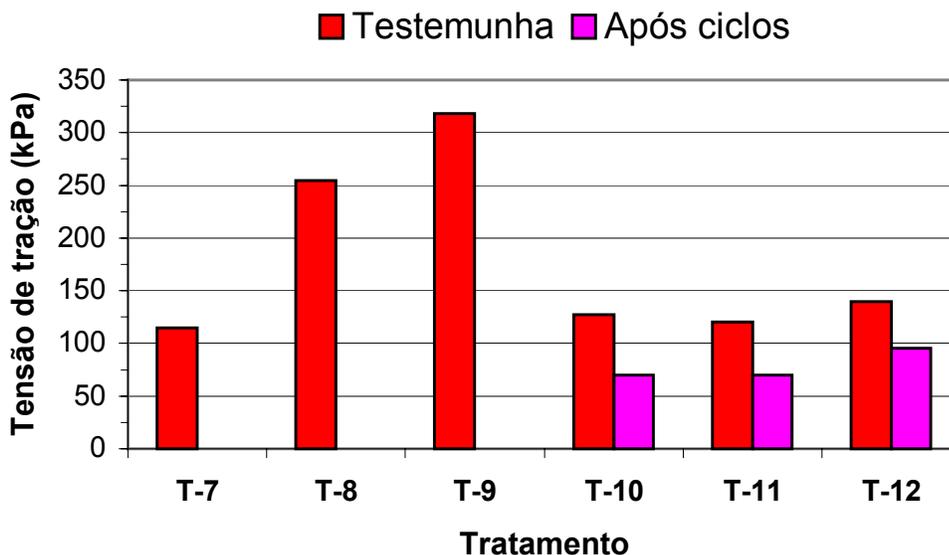
Os valores de resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de solos argiloso e arenoso, adicionados de cal e tratados com “água-de-cola” concentrada, submetidos ao ensaio de durabilidade, estão apresentados nas Figuras 90 e 91.

Para o solo argiloso (T1), os valores de resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova, submetidos aos ciclos alternados de molhamento e secagem e curados em câmara úmida, apresentaram uma relação de 80,55% entre os valores tomados antes e após a aplicação dos ciclos; esta relação é muito próxima, 80,08 e 81,26%, respectivamente, para o solo argiloso tratado com 15% de “água-de-cola” concentrada a 5 e 10%. No caso do solo argiloso tratado com 3% de cal, a relação se inverteu, 105,56%, passando o valor de resistência à tração de corpos-de-prova submetidos aos ciclos alternados de molhamento e secagem a ser superior ao daqueles corpos-de-prova curados em câmara úmida; a mesma tendência também foi verificada para o solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola” concentrada a 5 e 10% (135,29 e 133,33%, respectivamente).

No caso do solo arenoso e solo arenoso tratado com “água-de-cola”, os corpos-de-prova não resistiram ao ensaio, a partir do segundo ciclo. Para o solo arenoso tratado com cal, a relação entre as resistências à tração de corpos-de-prova submetidos a ciclos alternados de molhamento e secagem, curados em câmara úmida, foi 55,0%; e para o solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola” concentrada a 5 e 10%, a relação foi de 58,15 e 68,18%, respectivamente. Verificou-se que, nos três casos, a relação foi inferior a 80%, muito embora, durante todos os ciclos, os corpos-de-prova desses tratamentos tivessem apresentado bom desempenho, exceção feita ao tratamento T12, que apresentou eflorescência de sais, a partir do segundo ciclo.



**FIGURA 90** – Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal, tratados com “água-de-cola”, antes e após os ciclos alternados de molhamento e secagem



**FIGURA 91** – Resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de solo arenoso e solo arenoso adicionados de cal, tratado com “água-de-cola”, antes e após os ciclos alternados de molhamento e secagem.

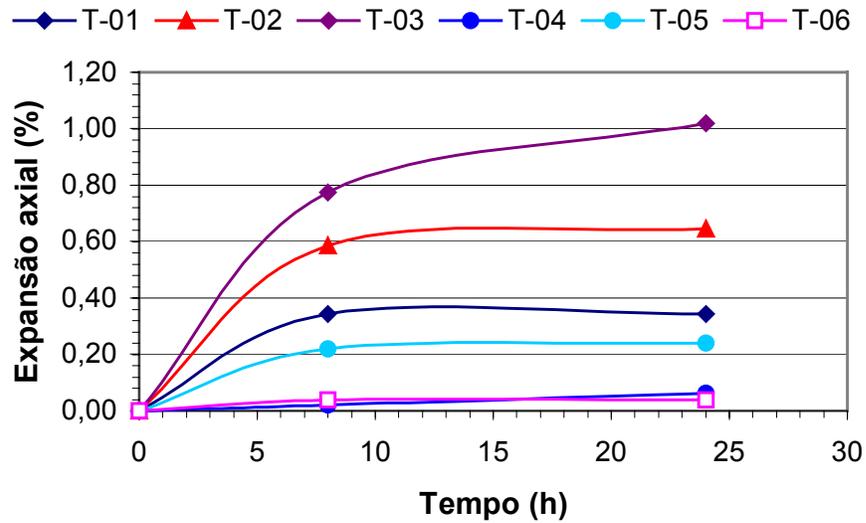
De maneira geral, os corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso tratado com cal e diferentes doses de “água-de-cola”, suportaram melhor os ciclos de molhamento e secagem; no caso específico do solo argiloso tratado com cal, ocorreu um trincamento do corpo-de-prova, a partir do segundo ciclo, e, para o solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola” concentrada a 10%, o aparecimento de cristais de sais, na sua superfície superior, a partir do terceiro ciclo. Ao final do ensaio, foi observado que o corpo-de-prova do tratamento T1 sofreu pouca erosão e trincamento, não comprometendo sua integridade; nos tratamentos T2 e T3, apareceram fissuras normais à sua geratriz, enquanto que no tratamento T4, ocorreu apenas pequena erosão no bordo inferior; os corpos-de-prova dos tratamentos T5 e T6 permaneceram em perfeito estado. Para os corpos-de-prova do solo arenoso, os tratamentos T10, T11 e T12 apresentaram um bom desempenho durante todo o processo.

Os corpos-de-prova de solo argiloso reagiram melhor ao ensaio de durabilidade, independentemente do tratamento, em relação ao solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal e tratados com “água-de-cola”. A ordem de grandeza dos valores de resistência à tração na compressão diametral apresentados por corpos-de-prova de 5 x 5 cm (diâmetro x altura), tanto nos ensaios de durabilidade como nos ensaios de tração, foi a mesma, assim como os valores de resistência à tração dentro dos respectivos tratamentos.

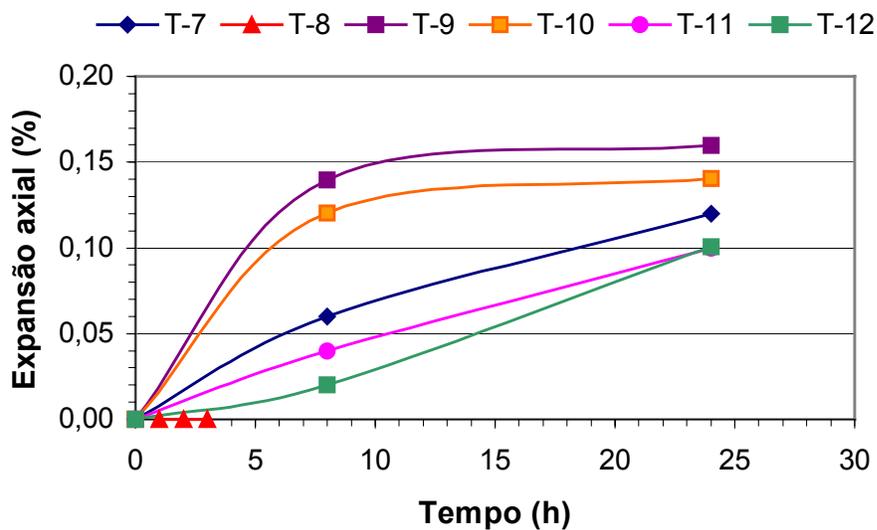
### **Expansão e contração axiais**

Os resultados das medições da expansão axial de corpos-de-prova submetidos ao primeiro ciclo do ensaio de durabilidade, para os solos argiloso e arenoso, estão mostrados nas Figuras 92 e 93, respectivamente, enquanto que os referentes ao segundo, nas Figuras 94 e 95; os do terceiro ciclo, nas Figuras 96 e 97, e finalmente os do quarto ciclo, nas Figuras 98 e 99. Os valores de contração axial dos corpos-de-prova de solos argiloso e arenoso, referentes ao primeiro ciclo, estão mostrados nas Figuras 100 e 101; os do segundo ciclo, nas Figuras

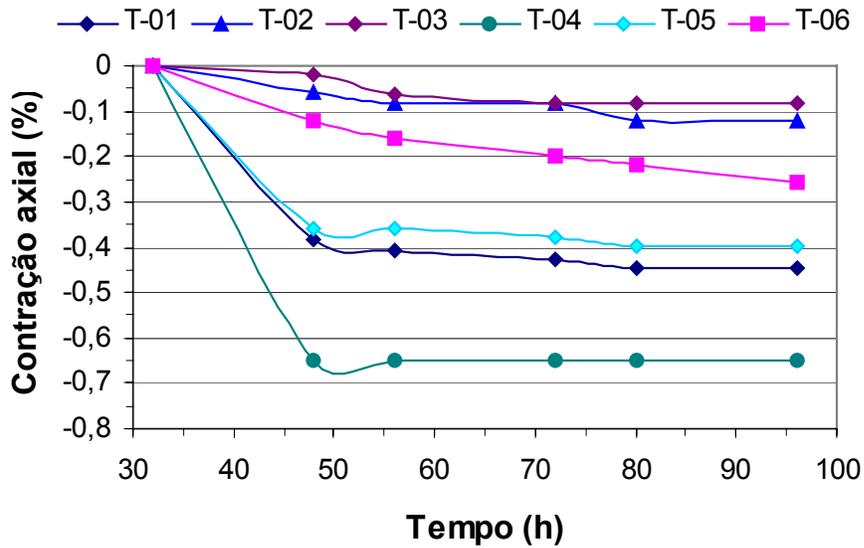
102 e 103; os do terceiro ciclo, nas Figuras 104 e 105; os do quarto ciclo, nas Figuras 106 e 107.



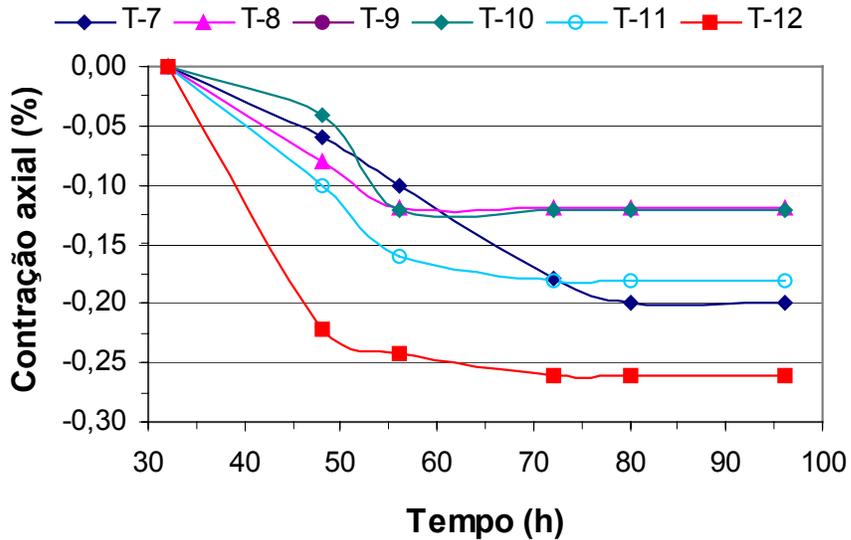
**FIGURA 92** – Expansão axial dos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o primeiro ciclo de molhamento e secagem.



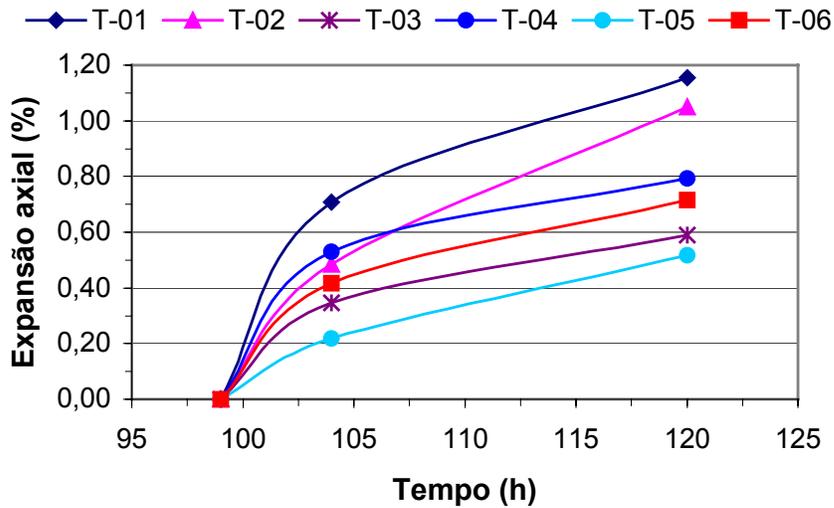
**FIGURA 93** – Expansão axial dos corpos-de-prova de solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o primeiro ciclo de molhamento e secagem.



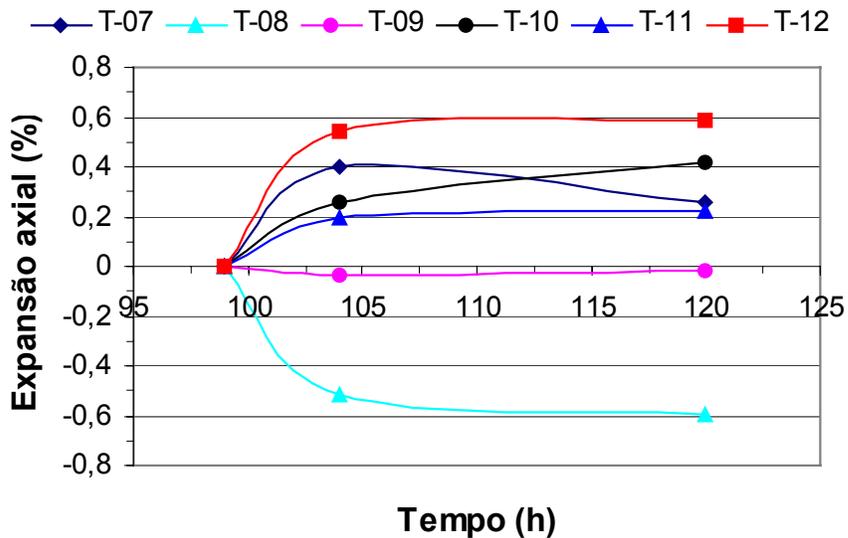
**FIGURA 94** – Contração axial dos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante primeiro ciclo de molhamento e secagem.



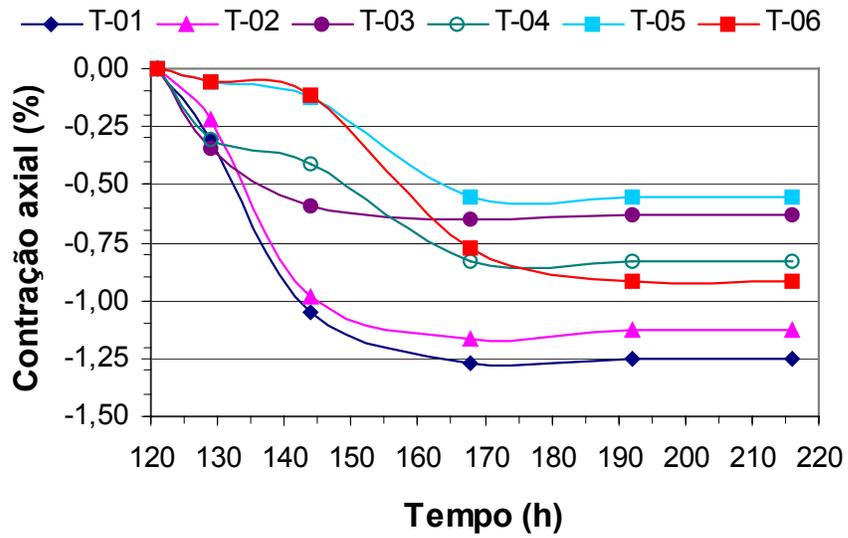
**FIGURA 95** – Contração axial dos corpos-de-prova de solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o primeiro ciclo de molhamento e secagem.



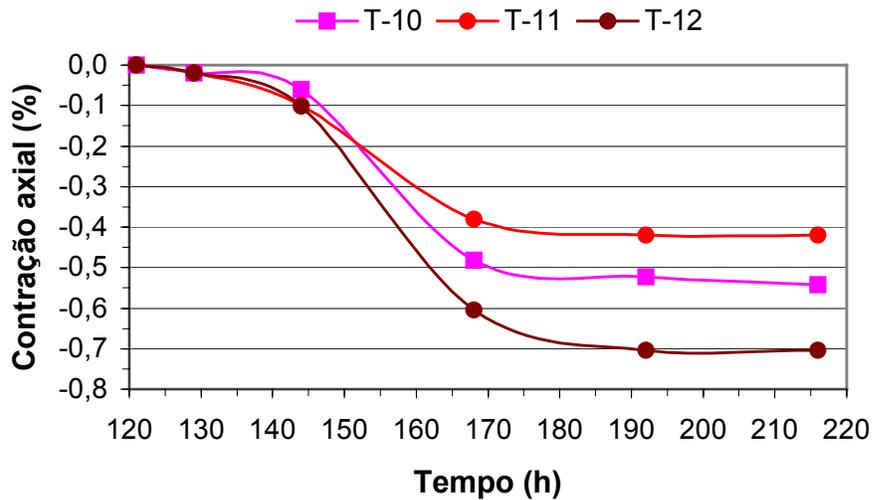
**FIGURA 96** – Expansão axial dos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o segundo ciclo de molhamento e secagem.



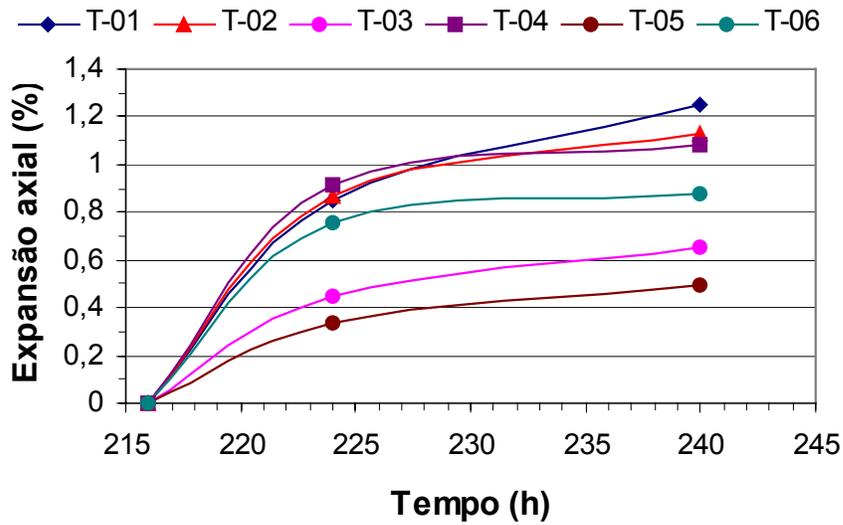
**FIGURA 97** – Expansão axial dos corpos-de-prova de solo arenoso e solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o segundo ciclo de molhamento e secagem.



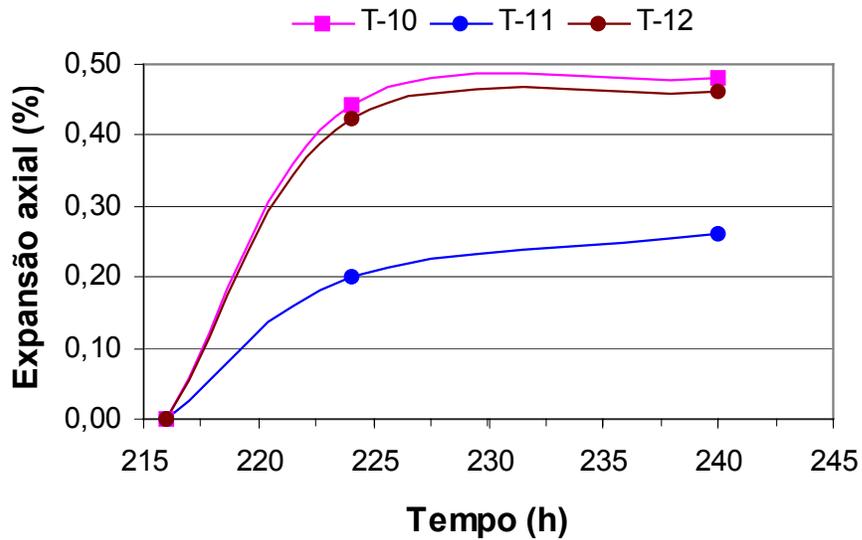
**FIGURA 98** – Contração axial dos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o segundo ciclo de molhamento e secagem.



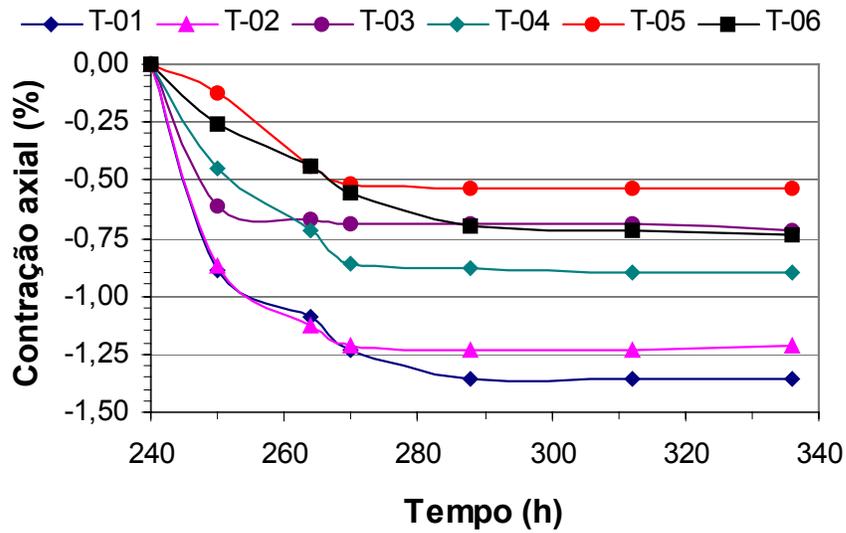
**FIGURA 99** – Contração axial dos corpos-de-prova de solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o segundo ciclo de molhamento e secagem.



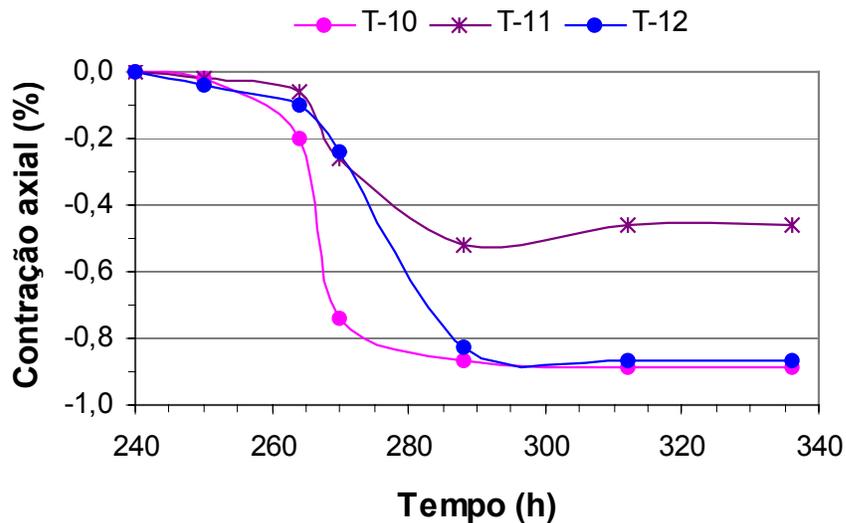
**FIGURA 100** – Expansão axial dos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o terceiro ciclo de molhamento e secagem.



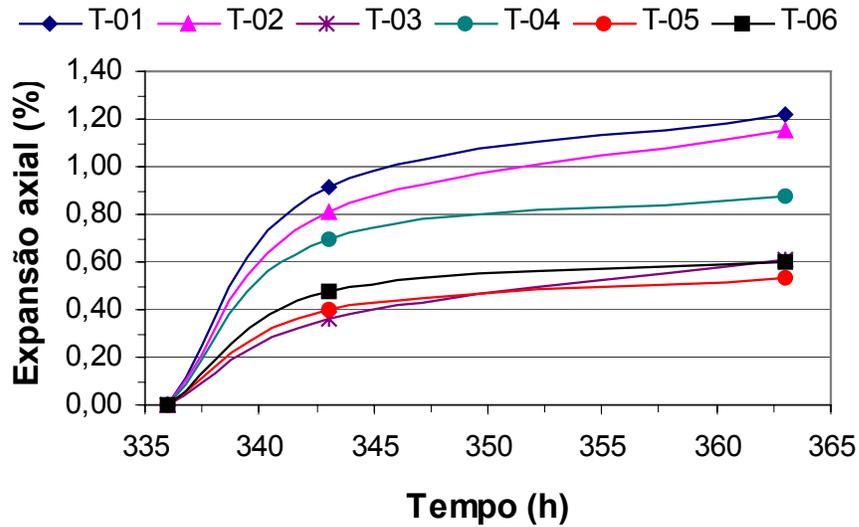
**FIGURA 101** – Expansão axial dos corpos-de-prova de solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o terceiro ciclo de molhamento e secagem.



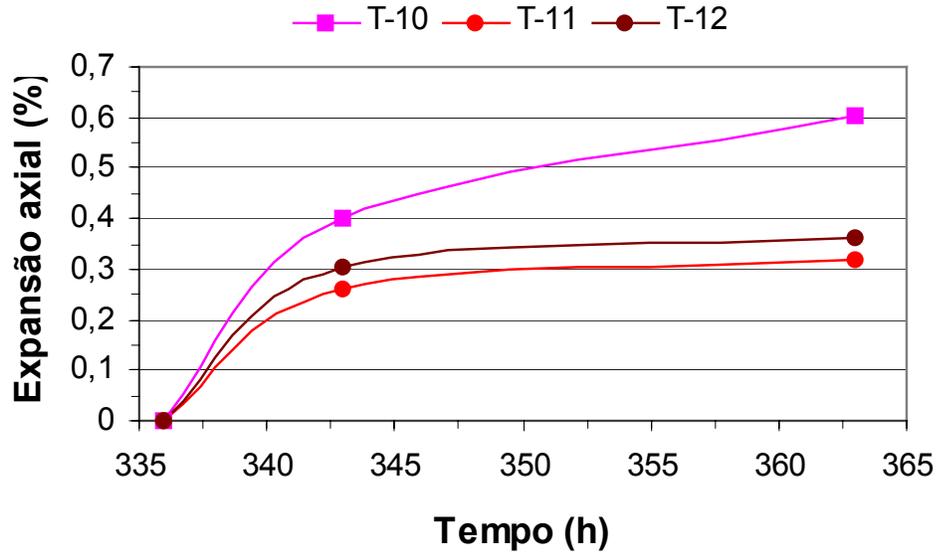
**FIGURA 102** – Contração axial dos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o terceiro ciclo de molhamento e secagem.



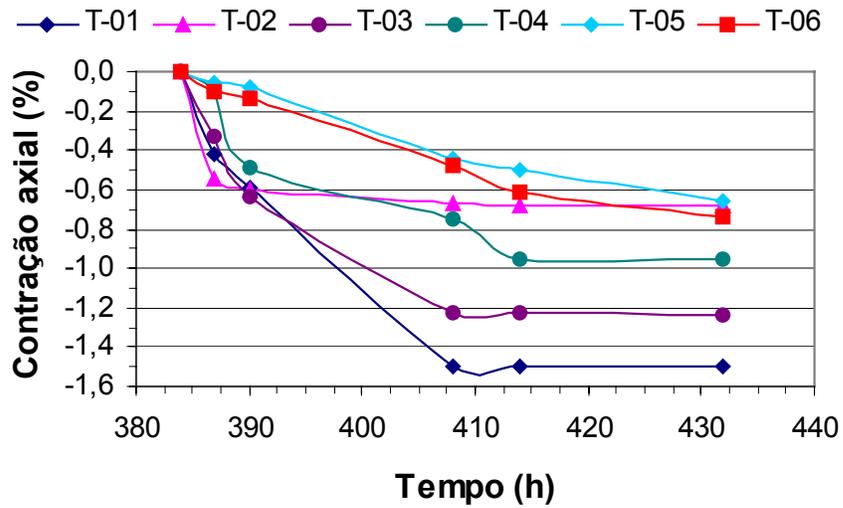
**FIGURA 103** – Contração axial dos corpos-de-prova de solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o terceiro ciclo de molhamento e secagem.



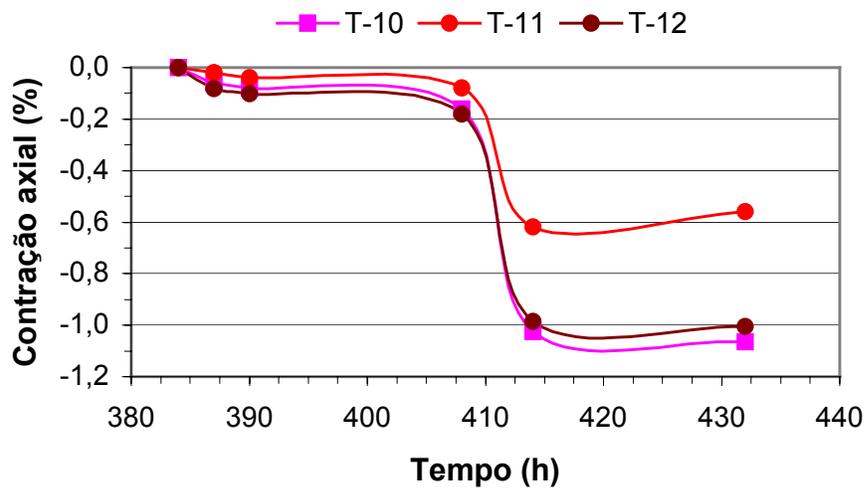
**FIGURA 104** – Expansão axial dos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o quarto ciclo de molhamento e secagem.



**FIGURA 105** – Expansão axial dos corpos-de-prova de solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o quarto ciclo de molhamento e secagem.



**FIGURA 106** – Contração axial dos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o quarto ciclo de molhamento e secagem.



**FIGURA 107** – Contração axial dos corpos-de-prova de solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, durante o quarto ciclo de molhamento e secagem.

### **Primeiro ciclo**

Com relação à expansão, determinada durante o ensaio de durabilidade, por ciclos alternados de molhamento e secagem, os resultados mostraram que, para o solo argiloso e solo argiloso tratado com 3% de cal e “água-de-cola” em diferentes concentrações (Figura 92), os maiores valores foram obtidos para o tratamento T3, seguido dos tratamentos T2 e T1 (solo natural), diferentes entre si, sendo os menores valores relacionados aos tratamentos T4 e T6, seguidos do T5. Para o solo arenoso e solo arenoso tratado com cal (Figura 93), os maiores valores de expansão axial foram obtidos para os tratamentos T9 e T10, e os menores, para os tratamentos T12, T11 e o solo natural.

Com relação à contração axial dos corpos-de-prova de solo argiloso tratado com “água-de-cola” e cal (Figura 94), os maiores valores foram obtidos para os tratamentos T4, T1 (solo natural) e T5, e os menores, para os tratamentos T3 e T2, iguais entre si, e o tratamento T6. No caso específico do solo arenoso, os maiores valores de contração foram alcançados pelo tratamento T12, seguido pelos tratamentos T11 e T10.

### **Segundo ciclo**

No caso do solo argiloso e solo argiloso tratado com cal e “água-de-cola” (Figura 96), o maior valor de expansão axial foi apresentado pelo tratamento T1, seguido dos tratamentos T2, T4, T6, T3 e T5, em ordem decrescente. No caso do solo arenoso (Figura 97), o maior valor foi apresentado pelo tratamento T12, seguido dos tratamentos T10 e T11; os demais tratamentos não manifestaram qualquer padrão de comportamento, tendo sido abandonadas as leituras a partir deste ciclo, até mesmo porque os corpos-de-prova se desagregavam durante o ensaio.

O maior valor de contração do solo argiloso e solo argiloso tratado com cal e com “água-de-cola” concentrada (Figura 98) foi obtido para os tratamentos T1

(solo natural) e T2, seguidos dos T6, T4 e T3, sendo o menor valor alcançado pelo tratamento T5. Para o solo arenoso e solo arenoso tratado com cal e 8% de “água-de-cola” (Figura 99), o menor valor de contração foi obtido para o tratamento T11, seguido de T10 e T12.

### **Terceiro ciclo**

Com relação às expansões apresentadas pelos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso tratado com cal e 15% de “água-de-cola” (Figura 100), verificou-se que o maior valor foi obtido para o tratamento T1 (solo natural), seguido dos tratamentos T2 e T4, praticamente idênticos, e T6 e T3, e sendo o menor valor obtido para o tratamento T5. No caso do solo arenoso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola” (Figura 101), os maiores valores de expansão, foram obtidos para os tratamentos T10 e T12, e o menor valor, para o tratamento T11.

Com relação à contração (Figura 102) dos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso tratado com cal e “água-de-cola”, o maior valor foi obtido para o tratamento T1 (solo natural), seguido dos tratamentos T2 e T4; os menores valores foram apresentados pelos tratamentos T5, T6 e T3. Para o solo arenoso (Figura 103), o menor valor de contração foi obtido para o tratamento T11 e tratamentos T10 e T12, praticamente idênticos.

### **Quarto ciclo**

Com relação aos valores de expansão apresentados pelos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso tratado com cal e “água-de-cola” (Figura 104), os menores valores foram alcançados pelos tratamentos T5, T6 e T3, seguidos de T4, T2 e, por último, com o maior valor, o tratamento T1 (solo natural). No caso do solo arenoso (Figura 105), o menor valor foi obtido para o tratamento T11, seguido dos tratamentos T12 e T10.

Com relação às medições de contração axial dos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso tratado com cal e “água-de-cola” (Figura 106), os menores valores obtidos foram para os tratamentos T5, T6 e T2, seguidos de T4 e T3, e todos inferiores ao solo natural (T1). Para o solo arenoso tratado com cal e “água-de-cola” (Figura 107), os menores valores de contração foram obtidos para os tratamentos T11, seguidos de T12 e T10, praticamente idênticos.

Analisando ciclo a ciclo, observa-se que, no que se refere à expansão, o tratamento do solo argiloso e solo-cal com “água-de-cola” conduziu a maiores valores, enquanto que, para o solo natural, o valor obtido está dentro dos limites estabelecidos para o ensaio CBR com corpos-de-prova confinados e embebidos por 96 h (DER-SP, 1991). No caso do solo arenoso, verificou-se a ocorrência de baixos valores de expansão. De maneira geral, os tratamentos com solo arenoso alcançaram menores valores de expansão em relação ao solo argiloso. Observou-se, também, que os valores de expansão, no segundo ciclo, foram superiores aos do primeiro, permanecendo essa diferença estabilizada nos terceiro e quarto ciclos.

De um modo geral, os menores valores de expansão, para o solo argiloso, foram apresentados pelo tratamento T5, seguido de T6 e T4; os maiores valores, pelos tratamentos T2, T1 (solo natural) e T3. Para o solo arenoso, os menores valores estiveram associados ao tratamento T11, em todos os ciclos, seguido de T12 e T10; os demais não resistiram ao ensaio.

Em relação à contração axial dos corpos-de-prova de solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, os menores valores foram apresentados pelo tratamento T5, seguido de T6 e T4, T2 e T3, todos com valores inferiores à testemunha (solo natural). Para o solo arenoso, os menores valores foram apresentados pelos tratamentos T11, T12 e T10. De maneira geral, os valores de contração dos corpos-de-prova de solo arenoso foram sempre

menores que os do argiloso. Os tratamentos com cal e diferentes doses de “água-de-cola” aplicados aos solos argiloso e arenoso promoveram uma estabilização volumétrica dos corpos-de-prova, avaliada pelos baixos valores de expansão e contração axiais.

## 5 . CONCLUSÕES

Com dados obtidos, interpretados e analisados estatisticamente, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- não foi constatado efeito algum das concentrações de “água-de-cola” (0%, 5% e 10% de PVA) sobre os parâmetros de compactação dos solos estudados, independentemente da dosagem de resíduo empregada;
- a resistência à compressão simples de corpos-de-prova confeccionados com solos argiloso e arenoso, tratados com “água-de-cola” e curados ao ar livre e à sombra, aumentou com o acréscimo da concentração de PVA no resíduo;
- corpos-de-prova de solo arenoso-1, tratados com cal e “água-de-cola” em diversas concentrações e curados em câmara úmida, apresentaram valores de resistência à compressão simples inferiores aos da testemunha;
- o acréscimo do teor de cal de 3% para 5% não aumentou significativamente a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova de solo arenoso-1, independentemente da concentração de “água-de-cola” empregada;
- a adição de 3% de cal ao solo argiloso levou a maiores valores de resistência à compressão simples, em relação ao solo arenoso, independentemente do tempo de cura e da concentração de “água-de-cola”;
- os valores do limite de liquidez do solo argiloso foram reduzido pelo tratamento do solo com 3% de cal, independentemente da concentração do resíduo “água-de-cola” empregada;
- a adição de 3% de cal aos solos resultou em acréscimo da resistência à compressão simples com o aumento do tempo de cura;

- independentemente do tipo de cura utilizado, a imersão em água provocou reduções da capacidade de suporte dos solos tratados com cal e “água-de-cola”, expressa através de índices de CBR;
- a adição de 3% de cal ao solo arenoso estudado reduziu o valor do peso específico aparente seco máximo e aumentou o teor de umidade ótima do ensaio de compactação, independentemente da concentração de “água-de-cola” utilizada;
- a resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de solo argiloso foi sempre superior à do solo arenoso, quer fossem eles tratados ou não com “água-de-cola” e cal;
- a resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de solo tratado com “água-de-cola” e adicionado de cal, aumentou com a idade de ruptura dos mesmos;
- os valores de resistência à tração na compressão diametral dos corpos-de-prova de solos argiloso e arenoso submetidos a diferentes tratamentos com o resíduo “água-de-cola” e cal, e sujeitos a diferentes tempos de cura, foram inferiores aos da testemunha;
- independentemente do tratamento aplicado e da época de ensaio, os valores do índice de CBR-Adaptado foram sempre maiores para o solo arenoso do que para o argiloso, alcançando o máximo quando os solos eram tratados com “água-de-cola” e cal;
- a adição de cal ao solo levou a aumentos do índice de CBR-Adaptado com o aumento do tempo de cura;
- o tratamento de ambos os solos com o resíduo “água-de-cola” reduziu os valores do índice mini-CBR obtidos para a condição imersa, aumentando-os quando a condição era não imersa para corpos-de-prova ensaiados aos 21 dias de idade;
- os valores do coeficiente de determinação obtidos através de correlação matemática entre a resistência à compressão simples e a resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova confeccionados com os solos argiloso e arenoso estudados, tratados com resíduo “água-de-cola” e cal,

indicou forte associação entre os parâmetros estudados; para os solos tratados unicamente com resíduo “água-de-cola” e independentemente da concentração e tempo de cura considerados, tal correlação não existiu;

- a forte correlação existente entre os índices de suporte obtidos dos ensaios de CBR-Adaptado e CBR convencional, indicaram que se pode utilizar moldes cilíndricos de PVC em substituição aos moldes cilíndricos de aço, sem qualquer prejuízo dos resultados obtidos;
- com relação aos tratamentos T1 (solo argiloso), T2 (solo argiloso tratado com “água-de-cola” concentrada a 5%), T3 (solo argiloso tratado com “água-de-cola” concentrada a 10%) e T4 (solo argiloso tratado com cal), e para as mesmas tensões-desvio e tensões de confinamento aplicadas, os valores do módulo de resiliência foram maiores para o solo argiloso do que para o solo arenoso;
- os maiores valores de módulo de resiliência, todavia, foram obtidos para o solo arenoso tratado com cal e “água-de-cola”;
- para valores de  $\sigma_d < k_1$ , a adição de 3% de cal ao solo argiloso tratado com resíduo “água-de-cola”, qualquer que seja a concentração, provocou aumento dos valores do módulo de resiliência; no caso de  $\sigma_d > k_1$ , o valor do módulo foi praticamente constante;
- as correlações matemáticas entre os índices de CBR-Adaptado e os de mini-CBR com o módulo de resiliência, para o solo argiloso e solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, apresentaram valores razoáveis,  $R^2$  inferiores a 0,75, de coeficientes de determinação;
- os teores de umidade dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de tração na compressão diametral, após a realização dos ensaios de durabilidade por molhamento e secagem, foram inferiores aos teores de umidade ótimos de compactação;
- durante todos os ciclos alternados de molhamento e secagem, os teores de umidade dos corpos-de-prova em ensaio não sofreram grandes variações;
- a resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova de solo argiloso adicionado de cal e tratado com “água-de-cola”, determinada logo

após a realização do ensaio de durabilidade, apresentou valores superiores à resistência dos corpos-de-prova curados em câmara úmida;

- independentemente do tipo de solo e da concentração de resíduo utilizada, a adição de cal reduziu a resistência à compressão simples e resistência à tração na compressão diametral de corpos-de-prova rompidos aos 21 dias de idade, em relação à testemunha;
- corpos-de-prova de solo argiloso reagiram melhor ao ensaio de durabilidade, não se desfazendo, quando imersos em água, e apresentando menor incidência de trincas;
- sob qualquer aspecto considerado, os corpos-de-prova de solo argiloso apresentaram os maiores valores de expansão e contração axiais do que os de solo arenoso;
- a partir do segundo ciclo de molhamento e secagem do ensaio de durabilidade, os valores de expansão e contração axiais se estabilizaram;
- o tratamento do solo unicamente com “água-de-cola” afetou negativamente, em relação ao tempo de cura, a resistência à compressão simples, a resistência à tração na compressão diametral e a capacidade de suporte do solo expressa através do índice CBR-Adaptado;
- corpos-de-prova confeccionados apenas com solo arenoso tratado com “água-de-cola” não resistiram ao ensaio de durabilidade por ciclos alternados de molhamento e secagem, desfazendo-se quando imersos em água;
- o solo argiloso apresentou sempre valores elevados de módulo de resiliência, em relação ao solo arenoso; contudo, apresentou, também, maiores valores de expansão e de contração axiais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - NBR-06459: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984. 6p.

\_\_\_\_\_ -NBR-07180: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984. 3p.

\_\_\_\_\_ -NBR-10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987. 63p.

\_\_\_\_\_ -NBR-10005: Lixiviação de resíduos. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987. 7p.

\_\_\_\_\_ -NBR-10006: Solubilização de resíduos. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987. 2p.

\_\_\_\_\_ -NBR-10007: Amostragem de resíduos - procedimento. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987. 25p.

\_\_\_\_\_ -NBR-12023: Solo-Cimento-ensaio de compactação. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990. 9p.

\_\_\_\_\_ -NBR-12024: Solo-Cimento-moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990. 8p.

\_\_\_\_\_ -NBR-12025: Solo-Cimento-ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990. 3p.

\_\_\_\_\_ -NBR-6508: Solo-determinação da massa específica dos grãos do solo. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984. 2p.

\_\_\_\_\_ -NBR-7181: Solo-análise granulométrica. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984. 13p.

\_\_\_\_\_ -NBR-07182: Solo-ensaio normal de compactação. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984. 2p.

\_\_\_\_\_ -NBR-09895: Solo-índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986. 12p.

\_\_\_\_\_ -NBR-06457: Preparação de amostras de solo para ensaio normal de compactação e ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984. 1p.

AFRITOS, A. O. e FERREIRA, H. C. – Estabilização química de um solo laterítico com cal + traços de NaOH. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solo e Engenharia de Fundações, 8. Porto Alegre-RS, 1986. ABMS. Anais... vol. 2, p. 9-21.

ALCÂNTARA, M. A. M.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S. e COSTA, L. M. - Estabilização química dos solos em estradas agrícolas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 24. Viçosa-MG, 1995. SBEA/UFV. Anais..., Resumo Publicado. p. 158.

ALVAREZ NETO, L.; BERNUCCI, L.B. e NOGAMI, J. S. – Proposta de um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis para vias de baixo volume de tráfego com a utilização de solos lateríticos. In: Reunião Anual de Pavimentação, 31. São Paulo-SP, 1998. ABPv, Anais... vol. 1, p. 372-389.

AMORIM, L. A; NEVES, G. A e FERREIRA, H. C. – Estabilização de solos vermelhos tropicais com cais pozolânicas. In: Reunião Anual de Pavimentação, 30. Salvador-BA, 1996. ABPv. Anais... vol. 1, p. 301-327.

- AQUINO FILHO, G. C. e NOGUEIRA, J. B. – Compactação de solos com energias, aproximadamente, iguais e diferentes procedimentos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 10. Foz do Iguaçu-PR, 1994. ABMS. Anais... vol. 2, p. 387-372.
- AUGUSTO JUNIOR, F. e CUNHA, M. A. - Utilização de resíduo industrial, de fabricação do gás acetileno, na estabilização de solos para emprego como revestimento primário. In: Reunião Anual de Pavimentação, 24. Belém-PA, 1990. ABPv. Anais... vol. 1, p. 256-268.
- BERNUCCI, L. L. B. - Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego. São Paulo-SP, 1995. USP/POLITÉCNICA (Tese de Doutorado) 237p.
- BODI, J.; BRITO FILHO, J. A. E ALMEIDA, S. – Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. In: Reunião Anual de Pavimentação, 29. Cuiabá-MT, 1995. ABPv, Anais... vol. 3, p. 408-436.
- BRAZETTI, R. – Aditivos orgânicos para estabilização e técnicas associadas para avaliação dos compósitos organominerais-difração de raio-X. In: Simpósio Internacional de Rodovia de Baixo Volume de Tráfego, 1. Rio de Janeiro-RJ. 1997, ABPv, Anais... vol. 1, p. 118-127.
- BUSSAMRA, H. R. V. – Estabilização química de solos-realidade de um novo conceito em pavimentação. In: Simpósio Internacional de Rodovia de Baixo Volume de Tráfego, 1. Rio de Janeiro-RJ, 1997. ABPv., Anais... vol. 1, p. 275-295.
- CAJAZEIRAS, A. P.; CASTILHOS, A. B.; MACCARINI, M. e SENEM, J. – Perspectiva de utilização do fosfogesso na pavimentação de estradas secundárias – aspectos tecnológicos e ambientais. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 7. Florianópolis-SC, 1998. Anais... vol. 1, p. 857-861.
- CAMPOS, O. J. - Utilização de escórias siderúrgicas em pavimentação. USP/ POLITÉCNICA, 1987 (Dissertação de mestrado) 142 p.
- CARVALHO, J. B. Q. – Classificação de solos lateríticos baseado no processo de estabilização solo/cal. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em

Engenharia. Rio de Janeiro-RJ, 1981, Anais... Rio de Janeiro-RJ. COPPE/UFRJ-CNPq-ABMS. P.442-452.

CETESB – Resíduos sólidos industriais – série ATAS – v. 1, São Paulo-SP, CETESB/ASCETESB, 1985. p.

CORRÊA, F. C. e FELEX, J. B. - Solo-cal e CBR. In: Reunião Anual de Pavimentação, 21. Belém-PA, 1990. ABPV, Anais... v. 1, p.118 - 129.

CROSS, S. A. e FAGER, G. A. - Fly ash in cold recycled betuminous pavements. Transportation Research Record, 1486. TRB, Washington, D.C., 1995. p. 49-56.

DAWSON, A. R.; ELLIOTT, R. C.; ROWE, G. M. e WILLIAMS, J. - Assessment of suitability of some industrial by-products for use in pavement bases in the United Kingdom. Transportation Research Record, 1486. TRB, Washington, D.C., 1995. p. 114 - 120.

DER - Manual Básico de estradas vicinais, São Paulo - SP, 3 vol 1987.

DNER – Manual de pavimentação. IPR/DNER, 697/100. Rio de Janeiro-RJ. 1996. 320p.

DNER – Método de projeto de pavimento semi-rígido: aplicação para o caso de base pozolânica. IPR/DNER, 693/22. Rio de Janeiro-RJ. 1984. 43p.

FOGAÇA, B. C e CERATTI, J. A. P. – Análise paramétrica de estruturas de pavimento com camadas de solo estabilizado com cal e cinza volante. In: Reunião Anual de Pavimentação, 30. Salvador-BA, 1996. ABPV. Anais...,vol. 1, p. 389-412.

FRANZOI, S. - Algumas peculiaridades resilientes de solos lateríticos e saprolíticos. USP/POLITÉCNICA, 1990, São Paulo-SP (Dissertação de mestrado).120p.

- GABR, M. A.; BOURY, E. M. e BOWDERS, J. J. - Leachate characteristes of fly ash stabilized with lime sludge. Transportation Research Record,1486. TRB, Washington, D.C., 1995. p. 13-20.
- GIUMMARRA, G. J.; FOLEY, G. e CROPLEY, S. - Dust control Australasian experiences with various chemical additives. Transportation Research Record,1589. TRB, Washington, D.C., 1997. p. 50-53.
- GODOY, H.; BERNUCCI, L. A e CARVALHO, A – O uso de recursos pedológicos no estudo geotécnico preliminar para obras viárias utilizando o método das pastilhas MCT. In: Simpósio Internacional de Rodovia de Baixo Volume de Tráfego, 1. Rio de Janeiro-RJ, 1997. ABPv, Anais...,vol. 2, p. 527-540.
- GODOY, H.; NOGAMI, J.S.; BERNUCCI, L., e MOURA, E. – O uso de mapas pedológicos e do método das pastilhas MCT para o aproveitamento de solos lateríticos em obras viárias. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solo e Engenharia Geotécnica, 11. Brasilia-DF, 1998. ABMS. Anais... vol. 1, p. 95-100.
- GRESS, D. L.; ZHANG, X.; TARR, S.; PAZIENZA, I. e EIGHMY,T. – Municipal solid waste combustion ash as an aggregate substitute in asphaltic concrete. In: Proceedings of the international conference on environmental implications of construction with waste materials, 48. WASCON'91. Maastricht-netherlands. 1991, Elsevier. p. 161-175.
- GUIDA, H. e MEDINA, J. - Estabilização de solos lateríticos com ácido fosfórico. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, 5. São Paulo-SP,1974. ABMS, Anais..., vol. 2, p. 1 - 67.
- GUIMARÃES, J. E. P. – A cal - fundamentos e aplicações na engenharia civil. ABPC/PINI, São Paulo-SP, 1998. 285p.
- JOSHI, R. C.; LOHTIA, R. P. e ACHARI, G. - Fly ash-cement mixtures for solidification and detoxification of oil gaswell sludges. Transportation Research Record, 1486. TRB, Washington, D.C., 1995. p. 34-41.
- LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R. S.; DUNLOP, M. S. e FIGUEREDO, M. A. G. – Asfalto modificado por polímero-ligante resistente à formação de trincas e

- deformação permanente. In: Reunião Anual de Pavimentação, 29. Cuiabá-MT, 1995. ABPv, Anais..., vol. 2, p. 179-206.
- LIMA, D. C.; RÖHM, S. A. e BARBOSA, P. S. A. – Estabilização dos solos III – mistura solo-cal para fins rodoviários. UFV 334, Viçosa-MG. 1993, 46p.
- LUCENA, F. B.; BRASILEIRO, F. E. e SOBRINHO, T. A. – Umidade de equilíbrio de rodovias pavimentadas situadas no litoral e mata no estado da Paraíba. In: Reunião Anual de Pavimentação, 28. Belo Horizonte-MG, 1994. ABPv, Anais..., vol. 1, p. 284 - 295.
- MANK, J. A. M.; BRULOT, J.; LAAK, J. U. e W. H. – Incineration slag in road constructions. In: Proceedings of the international conference on environmental implications of construction with waste materials, 48. WASCON'91. Maastricht-Netherlands. 1991, Elsevier, p. 187-195.
- MARCON, A. F. – Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areia-calcinza volante. Rio de Janeiro-RJ, (Dissertação de Mestrado) COPPE/UFRJ, 1979.
- MEDINA, J. - Classification of tropical soils according to resilient characteristics for pavement design In: First international conference on geomechanics in tropical lateritic and saprolitic soils-tropicals 85. Brasília, 1985, ABMS, vol. 2, p. 321 - 325.
- MEDINA, J. e PREUSSLER, E. S. - Característica resilientes de solos em estudos de pavimento. Solos e Rochas, vol. 3 nº 1, 1980, Rio de Janeiro-RJ p. 3 - 26.
- MEDINA, J.- Mecânica dos pavimentos. Editora UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 1997, 380p.
- MEDINA, J.; GUIDA, H. N. – Notícia sobre o ácido fosfórico na estabilização de solos Lateríticos. In: Reunião Anual de Pavimentação, 21. Salvador-BA, 1996. ABPv, Anais..., vol. 1, p. 413 - 423.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. e CERATTI, J. A. - Estudos de resiliência na mecânica dos pavimentos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e

Engenharia de Fundações, 8. Porto Alegre-RS, 1986. ABMS, Anais..., vol. 4, p. 137 - 148.

MENDONÇA, A. A.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S. e FONTES, M. P. F. – Efeito da temperatura de cura na resistência à compressão simples de um Latossolo e de um solo saprolítico estabilizado com cal. In: Simpósio Internacional de Rodovia de Baixo Volume de Tráfego, 1. Rio de Janeiro-RJ, 1997. ABPv., Anais..., vol. 1, p. 264-274.

MONISMITH. C. L. – Analytically based asphalt pavement design and rehabilitation: theory to practice. 1962-1992. Transportation Research Record, 1354. TRB, Washington, D.C., 1992. p. 4-26.

MOTTA, L. M. G. e PINTO, S. – Três estudos de ensaio de ensaios dinâmicos usados como fator de decisão na escolha de materiais em pavimentação. In: Reunião Anual de Pavimentação, 2., Belo Horizonte-MG, 1994. ABPv, Anais..., vol. 1, p. 210-227.

MOTTA, L. M. G.; ARANOVICH, L. A. S. e CERATTI, J. A. P. – Comportamento resiliente de solos utilizados em pavimentação de baixo custo. Solos e Rochas. vol. 8, nº 3, 1985, p.15-42.

MT-DNER –DNER-ME 049/94: Solo - determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994. 14p.

\_\_\_\_\_ –DNER-ME 131/94: Solo – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994. 8p.

\_\_\_\_\_ –DNER-ME 181/94: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994. 7p.

\_\_\_\_\_ –DNER-ME 254/94: Solo compactados em equipamento miniatura – mini-CBR e expansão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994. 12p.

- \_\_\_\_\_  
-DNER-ME 228/94: Solo - compactação em equipamento miniatura – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1994. 14p.
- MULDER, E. The leaching behavior of some primary and secondary raw materials used in pilot-scale road bases. In: Proceedings of the international conference on environmental implications of construction with waste materials, 48, WASCON'91. Maastricht-Netherlands. 1991, Elsevier. p. 255-264.
- NARDI, J. V. - Cinza volante e cal hidratada na estabilização de solos arenosos para construção de sub-base e base de pavimento. Rio de Janeiro, DNER/IPR, 1987. 93p. (Publicação, 695).
- NÓBREGA, M. T. – Características e mecanismo de estabilização de solos tropicais com cal e cimento em pistas experimentais. São Paulo-SP. USP – Instituto de Geociências, 1995 (Tese de Doutorado), 247p.
- NÓBREGA, M. T. – Contribuição ao estudo da estabilização de solos finos tropicais com adição de cal para fins rodoviários. Aspectos mineralógicos e morfológicos de alguns solos das regiões sul e sudeste do Brasil. São Paulo-SP. USP – Instituto de Geociências, 1988 (Dissertação de Mestrado), 189p.
- NOGAMI, J. S. – Determinação do índice de suporte Califórnia com equipamento de dimensões reduzidas – ensaio mini-CBR. In: Reunião das administrações rodoviárias, 2. Brasília-DF, 1972. p.
- NOGAMI, J. S. – Ensaio MCT e suas aplicações em pavimentação. In: Colóquio de Solos Tropicais e Sub-tropicais e Suas Aplicações em Engenharia Civil, 2. Porto Alegre-RS, 1989. UFRGS. p.59-72.
- NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. - Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo-SP. 1995, Villibor, 213p.
- NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. – Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 10. Foz do Iguaçu-PR, 1994. ABMS. Anais... v. 4, p. 1293-1300.

- NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. – Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Rio de Janeiro, 1981. COPPE/UFRJ – CNPq - ABMS. p.30-41.
- PARREIRA, A. B. e OLIVA, J. A. O. – Estudo do desempenho de misturas de solo e fosfogesso com vistas à sua utilização em obras rodoviárias. In: Reunião Anual de Pavimentação, 29. Cuiaba-MT, 1995. ABPv, Anais..., vol. 2, p. 227-238.
- PERA, J. - State of the art report-use of waste materials in construction in western europe. In: Workshop sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil. São Paulo, 1996; Anais/Coord. V.M. John e J.R. Cavalcante - EPUSP/ANTAC. 1997. p. 1-20.
- PETRY, T. - Performace-based testing of chemical stabilizers. Transportation Research Record, 1058. TRB, Washington, D.C., 1997. p.36-41.
- PINTO, C. S. – Estabilização de pavimentos com cal. In: Reunião aberta da indústria da cal - uso da cal na engenharia civil, V. São Paulo-SP, ABPC/Escola Politécnica-USP. 1985. p.79-112.
- PINTO, C. S. – Equipamento reduzido para moldagem de corpos-de-prova de solo-aditivo. Rio de Janeiro-RJ, 1965. IPR 87-GTM. p. 1-65.
- POPOVIC, K.; KAMENIC, N.; TKALCIC-CIBOCI, B. SOUKUP, V. – Technical experience in the use of industrial waste for building materials production and environmental impact. In: Proceedings of the international conference on environmental implications of construction with waste materials, 48, WASCON'91. Maastricht-Netherlands. 1991, Elsevier. p. 479-490.
- PREUSSLER, E. S. – Estudo de deformação de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de reforço. Rio de Janeiro-RJ, 1983. COPPE/UFRJ (Tese de Doutorado). 266p.
- PREUSSLER, E. S. e PINTO S. – Proposta de método de reforço de pavimentos flexíveis, considerando a resiliência. In: Reunião Anual de Pavimentação, 17. Brasília-DF, 1982. ABPv. Anais..., Tema.2, p. 205 - 263.

- RODRIGUES, J. K. G. e LUCENA, F. B. - Avaliação estrutural de um trecho pavimentado com solos lateríticos, no estado da Paraíba, através de ensaios deflectométricos e pressiométricos. In: Reunião Anual de Pavimentação, 25. São Paulo-SP, 1991. ABPv, Anais...,vol. 4, p. 2531 - 2557.
- ROLIM, M. M. - Avaliação físico-mecânica do material solo-de vinhaça concentrada e sua utilização para fins de fabricação de tijolos. Campinas-SP, 1996. FEAGRI/UNICAMP. 90p. (Dissertação Mestrado).
- ROSA, J. S. - Lixivia de digestão da madeira novo processo de recuperação. Revista Química Industrial, 51 (606): 20-21, 1982.
- SANTOS, J. D.; MOTTA, L. M. G.; PINTO, S. e MIRANDA, L. M. - Caracterização dinâmica de solos Lateríticos de rodovias do estado de Mato Grosso. In: Reunião Anual de Pavimentação, 28. Mato Grosso-MT, 1995, ABPv, Anais...,vol. 2, p. 124-144.
- SHERWOOD, P. - State of the art review soil stabilization with cement and lime. TRL -Transport Research Laboratory. 1993, London-UK. 153p.
- SILVA, A. E.; NEYRET, A.; PERTERLI, Z. e LEAL, M. B. - Concretos poliméricos. In: Reunião Anual de Pavimentação, 30. Salvador-BA, 1996. ABPv. Anais... vol. 1, p. 241-259.
- SILVA, E. A. - Uso de escória de aciaria em pavimentação viária. In: Reunião Anual de Pavimentação, 28. Belo Horizonte-MG, 1994. ABPv. Anais..., vol.1, p. 262 - 283.
- SILVA, M. A. M. e CERATTI, J. A P. - Estudo da utilização de cinzas volantes do Rio Grande do Sul na estabilização de um solo residual. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Rio de Janeiro, 1981. COPPE/UFRJ - CNPq - ABMS. p.508-523.
- SILVEIRA, E. B. S. - Estabilização do solo. EESC-USP, São Paulo, 1967. Publicação n. 129, 50p.
- STORTE, M. e TEZUKA, Y. - Latex Estireno-Butadieno aplicação em concretos de cimento e polímero. São Paulo, EPUSP, 1992, BT/PCC-67, 9p.

- SVENSON, M. – Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 1980. (Dissertação de Mestrado). 144p.
- SVENSON, M. –Estudo de misturas solo-cal sob carregamento dinâmico. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Rio de Janeiro-RJ, 1981. COPPE/UFRJ-CNPq-ABMS. p. 385-414.
- THOMPSON, M. R. – Soil-lime mixture for construction of low-volume roads. Transportation Research Record, 160. TRB, Washington, D.C., 1967. p. 149-165.
- TITTLEBAUM, M. E.; THIMMEGOWDA, H.; SEALS, R. K. e JONES, S. C. - Leachate generation from raw and cement stabilized phosphogypsum. Transportation Research Record,1486. TRB, Washington, D.C., 1997. p. 27-34.
- VERTAMATTI, E. - Análise de alternativas para estabilização de solos finos da Amazônia. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 7. Olinda/Recife-PE, 1986. ABMS, Anais..., vol. 3, p. 139 - 150.
- VIEIRA, S. V. – Estabilização de solos com Licor Negro Kraft concentrado para fins rodoviário. UFV. Viçosa-MG, 1993, (Dissertação de Mestrado), 126p.
- VILAR, O. M. e ROHM, S. A. – Comparação entre um ensaio de compactação de solos em molde de dimensões reduzidas e o ensaio Proctor normal. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solo e Engenharia de Fundações, 10. Foz do Iguaçu-PR, 1994. ABMS. Anais... vol. 2, p. 373-380.
- VILLAR FILHO, O. C.; LUCENA, F. B. e FERREIRA, H. C. - Estabilização de solos lateríticos com cimento In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 7. Olinda/Recife-PE, 1982, ABMS. Anais..., vol. 5, p. 285 - 305.
- VILLIBOR, D. F. – Pavimentos econômicos. Novas considerações. Escola de Engenharia de São Carlos-USP. São Carlos-SP. 1981 (Tese de Doutorado), p.

VILLIBOR, D. F.; FABBRI, G. T. P.; CARVALHO, A. T. B. e SERRA, P. R. M. - Pavimentos experimentais para tráfego muito leve na região da grande São Paulo. In: Reunião Anual de Pavimentação, 25. São Paulo-SP, 1991, ABPv, Anais..., vol. 4, p. 2511-2529.

VISSER, A. T.; QUEIROZ, C. e HUDSON, W. R. – Study of resilient characteristics of Tropical soil for use in low-volume pavement design. In: Low-volume roads: Third international Conference, 1983. Transportation Research Record 898. Washington,DC. p. 133- 140.

YORDER, E. J. e WICTIZAK, M. V. – Principles of pavement design. New York. Jonh Wiley, 2ed. 1975. 711p.