Campus de São Carlos

*ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS
DE RESÍDUO DA FABRICAÇÃO DE PAPEL E SOLO PARA
UTILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA*

CARLOS ERNESTO CHÁVEZ MOLINA

ORIENTADOR: PROF. ASSOC. ALEXANDRE BENETTI PARREIRA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

CARLOS ERNESTO CHÁVEZ MOLINA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MISTURAS DE RESÍDUO DA FABRICAÇÃO DE
PAPEL E SOLO PARA UTILIZAÇÃO NA
CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço... 04/08/04

Ass:.....

Dissertação apresentada à escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração: Transportes.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100048921

Orientador: Prof. Assoc. Alexandre Benetti Parreira

**São Carlos
2004**

Class.	TESE EESC
Cott.	1499
Tombo	T170/04
Systno	1387089

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

C512e

Chávez Molina, Carlos Ernesto

Estudo do comportamento mecânico de misturas de resíduo da fabricação de papel e solo para utilização na construção rodoviária / Carlos Ernesto Chávez Molina. -- São Carlos, 2004.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.

Área: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Benetti Parreira.

1. Resíduos. 2. Lama de calcário. 3. Dregs. 4. Pasta de celulose. 5. Papel. 6. Pavimento. 7. Reciclagem. 8. Disposição de resíduos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **CARLOS ERNESTO CHÁVES MOLINA**

Dissertação defendida e julgada em 25-06-2004 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO

Prof. Associado **ALEXANDRE BENETTI PARREIRA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Associado **NILO CÉSAR CONSOLI**
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS)

APROVADO

Prof. Associado **JOSÉ LEOMAR FERNANDES JUNIOR**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Associado **JOSÉ LEOMAR FERNANDES JUNIOR**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Membro com categoria mais elevada da CPG, em exercício

DEDICATÓRIA

**Aos meus queridos filhos, Fabio e
Valentina, por ser a maior felicidade
e recompensa da minha vida**

AGRADECIMENTOS

Aos meus Pais, Carlos e Charito, e irmãos, Paula e Daniel, pelo incalculável apoio e carinho.

Ao professor Alexandre Benetti Parreira pelo incentivo, orientação e aportes para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos sócios de Connal srl., Carlos Caraffa, Oscar Catoira, Alfredo Alarcón pela ajuda, tolerância e estímulo para a realização do mestrado.

Aos professores Glauco Túlio Pessa Fabbri e José Leomar Fernandes Jr. por seus aportes e conselhos para a realização deste trabalho.

Ao pessoal do laboratório do departamento de transportes da EESC/USP, Gigante, Paulo e João, pela amizade e ajuda na execução dos ensaios de laboratório.

Aos meus amigos Caio Rubens, Fábio Zanchetta e Marcos Bottene Cunha pela ajuda na correção do texto e contribuições para realização deste trabalho.

A todos os professores, alunos, e funcionários do Departamento de Transportes da EESC/USP, pela colaboração e ensinamentos durante estes dois anos de permanência no Brasil.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos utilizada para realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS	1
1.2 OBJETIVO	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 INTRODUÇÃO	6
2.2 PRODUÇÃO DE PASTA DE CELULOSE E PAPEL	8
2.2.1 Processo Kraft ou processo ao sulfato.	10
2.2.2 Seqüência de operações Kraft	11
2.2.3 Processo mecânico	15
2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS LAMA DE CALCÁRIO E DREGS	17
2.3.1 Lama de calcário	18
2.3.2 Dregs	20
2.4 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE PASTA DE CELULOSE NA CONSTRUÇÃO CIVIL E RODOVIÁRIA	20
2.5 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO PAPEL NA AGRICULTURA	24
2.6 UTILIZAÇÃO DA CAL COMO ESTABILIZANTE	25
2.6.1 Efeitos da cal sobre as misturas	26
2.6.2 Materiais calcários estabilizados com cal	28

3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 INTRODUÇÃO	29
3.2 COLETA E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS	29
3.2.1 Resíduo da produção de pasta de celulose	29
3.2.2 Solos	30
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	31
3.3.1 Resíduo de pasta de celulose	31
3.3.1.1 Granulometria	31
3.3.1.2 Massa específica dos sólidos	31
3.3.1.3 Limites de Atterberg	32
3.3.2 Solos	32
3.3.2.1 Granulometria	32
3.3.2.2 Massa específica dos sólidos	33
3.3.2.3 Limites de Atterberg	33
3.3.2.4 Classificação dos solos	33
3.3.3 Cal	34
3.4 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS E ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	34
3.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS	36
3.5.1 Ensaio para determinação do índice suporte Califórnia	36
3.5.2 Resistência à compressão simples	37
3.5.2.1 Moldagem dos corpos-de-prova	37
3.5.2.2 Execução do ensaio de resistência à compressão simples	38
3.5.3 Resistência à tração por compressão diametral	39
3.5.3.1 Moldagem dos corpos-de-prova	39
3.5.3.2 Execução do ensaio de tração por compressão diametral	40
3.6 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA	41
3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
3.7.1 Método para aceitação dos corpos-de-prova	41
3.7.2 Análise de variância	42
3.8 FORMAÇÃO DE CRISTAIS NA SUPERFÍCIE DOS CORPOS-DE-PROVA	43
3.8.1 Ensaio de microscopia eletrônica por varredura	43
3.8.2 Ensaio de difração raios-X	44

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	46
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	46
4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS	54
4.3.1 Resistência à compressão simples	55
4.3.1.1 Resistência à compressão simples imediata	56
4.3.1.2 Resistência à compressão simples aos 7 dias de cura	59
4.3.1.3 Influência do tempo de cura na compressão simples	62
4.3.2 Resistência à tração indireta	64
4.3.2.1 Resistência à tração indireta aos 7 dias de cura	65
4.3.2.2 Influência do tempo de cura na tração indireta	68
4.3.3 Comparação das resistências à compressão simples e tração indireta	70
4.3.4 Índice de suporte Califórnia (CBR)	75
4.3.4.1 Índice de suporte Califórnia aos 7 dias de cura	75
4.3.4.2 Influência do tempo de cura no CBR	80
4.3.5 Relação da resistência à compressão simples e CBR	82
4.3.6 Relação da resistência à compressão diametral e CBR	83
4.3.7 Análise de variância	85
4.3.7.1 Significância do tipo de solo, teor de resíduo e teor de cal	85
4.3.7.2 Significância do tipo de solo e tempo de cura	88
4.4 ESTUDO DA FORMAÇÃO DE CRISTAIS NA SUPERFÍCIE DOS CORPOS-DE-PROVA	89
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	99
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	99
5.2 CONCLUSÕES	99
5.3 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
- ANEXO A -	110
- ANEXO B -	116
- ANEXO C -	118
- ANEXO D -	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Seções da máquina de papel	
	Fonte: Essential of pulping and papermaking, p. 57	10
Figura 2.2 –	Processo para a obtenção da pasta de celulose	12
Figura 2.3 –	Processo de recuperação da lixívia branca a partir da lixívia negra	14
Figura 2.4 –	Lama de calcário na condição natural	19
Figura 3.1 –	Lama de calcário e <i>dregs</i> na condição natural na indústria de papel	30
Figura 3.2 –	Lama de calcário e <i>dregs</i> após secagem e homogenização	30
Figura 3.3 –	Curva granulométrica do resíduo de pasta de celulose	31
Figura 3.4 –	Curvas granulométricas dos solos arenoso e argiloso lateríticos	32
Figura 3.5 –	Cura dos corpos-de-prova de CBR, (1) corpos-de-prova na câmara úmida, (2) corpo-de-prova imerso em água	36
Figura 3.6 –	Equipamento para moldagem dos corpos-de-prova de compressão simples (1) cilindro principal, (2) anéis complementares, (3) êmbolos espaçadores	37
Figura 3.7 –	Prensa para moldagem, VERSA TESTER 30M	38
Figura 3.8 –	Ruptura dos corpos-de-prova no ensaio de compressão simples	38
Figura 3.9 –	Equipamento utilizado para moldagem dos corpos-de-prova de tração por compressão diametral (1) cilindro principal, (2) êmbolo maior, (3) êmbolo menor	39
Figura 3.10 –	Ruptura dos corpos-de-prova de compressão diametral	40
Figura 4.1 –	Curvas de compactação das misturas de resíduo e solo arenoso, sem adição de cal, obtidas nos ensaios preliminares	48
Figura 4.2 –	Curvas de compactação das misturas de resíduo e solo argiloso sem adição de cal, obtidas nos ensaios preliminares	48
Figura 4.3 –	Curvas de compactação das diversas misturas constituídas com o solo arenoso	49
Figura 4.4 –	Curvas de compactação das diversas misturas constituídas com o solo argiloso	50
Figura 4.5 –	Massa específica seca máxima em função do teor de cal para as misturas com solo arenoso	51

Figura 4.6 –	Massa específica seca máxima em função do teor de cal para as misturas com solo argiloso	51
Figura 4.7 –	Umidade ótima em função do teor de cal para as misturas com solo arenoso	53
Figura 4.8 –	Umidade ótima em função do teor de cal para as misturas com solo argiloso	53
Figura 4.9 –	Variação da resistência à compressão simples imediata com o acréscimo do teor de resíduo para os solos arenoso e argiloso	57
Figura 4.10 –	Resistência à compressão simples imediata das misturas de solos arenoso e argiloso	58
Figura 4.11 –	Resistência à compressão simples em função do teor de cal para as misturas com solo arenoso	60
Figura 4.12 –	Resistência à compressão simples em função do teor de cal para as misturas com solo argiloso	60
Figura 4.13 –	Variação da resistência à compressão simples com o tempo de cura para as misturas de solo, resíduo e cal	63
Figura 4.14 –	Resistência à tração indireta em função do teor de cal para as misturas com solo arenoso	66
Figura 4.15 –	Resistência à tração indireta em função do teor de cal para as misturas com solo argiloso	66
Figura 4.16 –	Variação da resistência à tração indireta com o tempo de cura para as misturas de solo, resíduo e cal	69
Figura 4.17 –	Variação relativa das resistências à compressão simples (RCS) e à compressão diametral (RCD) em função do teor de cal para misturas sem adição de resíduo	71
Figura 4.18 –	Variação relativa das resistências à compressão simples (RCS) e à compressão diametral (RCD) em função do teor de cal para misturas com adição de resíduo	71
Figura 4.19 –	Envoltórias de Mohr Coulomb para solos puros, solos com adição de cal e solos com resíduo e cal	72
Figura 4.20 –	Relação das resistências à compressão diametral e compressão simples das misturas sem adição de resíduo	74
Figura 4.21 –	Relação das resistências à compressão diametral e compressão simples das misturas com adição de resíduo	74
Figura 4.22 –	Índice de suporte Califórnia em função do teor de cal para misturas de solo arenoso	76
Figura 4.23 –	Índice de suporte Califórnia em função do teor de cal para misturas de solo argiloso	77
Figura 4.24 –	Expansão em função do teor de cal para misturas de solo arenoso	78
Figura 4.25 –	Expansão em função do teor de cal para misturas de solo argiloso	79
Figura 4.26 –	Variação do CBR com o tempo de cura para as misturas de solo, resíduo e cal	80

Figura 4.27 – Relação do CBR e a resistência à compressão simples das misturas sem adição de resíduo	82
Figura 4.28 – Relação do CBR e a resistência à compressão simples das misturas com adição de resíduo	83
Figura 4.29 – Relação do CBR e a resistência à compressão diametral das misturas sem adição de resíduo	84
Figura 4.30 – Relação do CBR e a resistência à compressão diametral das misturas com adição de resíduo	85
Figura 4.31 – Desagregação superficial dos corpos-de-prova quando são expostos ao ar	90
Figura 4.32 – Corpo-de-prova após 21 dias na câmara úmida (a) e corpo-de-prova embrulhado em filme de PVC após 21 dias de deixado no ambiente do laboratório (b)	91
Figura 4.33 – Influência do teor de cal na formação de cristais de corpos-de-prova expostos ao ar. (a) Solo e resíduo; (b) solo, resíduo e 5% de cal; (c) solo, resíduo e 10% de cal	92
Figura 4.34 – Micro-estrutura do resíduo puro seco ao ar	96
Figura 4.35 – Micro-estrutura do resíduo puro re-hidratado e posteriormente seco na estufa a 50°C	96
Figura 4.36 – Micro-estrutura da amostra proveniente do corpo-de-prova constituído com 65% de solo e 35% de resíduo deixado 20 dias na câmara úmida	97
Figura 4.37 – Micro-estrutura dos cristais do corpo-de-prova constituído com 65% de solo e 35% de resíduo exposto ao ar	98
Figura 4.38 – Micro-estrutura dos cristais do corpo-de-prova constituído com 60% de solo, 35% de resíduo e 5% de cal exposto ao ar	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Maiores produtores e consumidores de pasta de celulose no ano 2000 (em mil toneladas) Fonte: BRACELPA (2001)	7
Tabela 2.2 –	Maiores produtores e consumidores de papel no ano 2000 (em mil toneladas) Fonte: BRACELPA (2001)	7
Tabela 2.3 –	Produção e consumo aparente de pasta de celulose nos anos 2001 e 2002 Fonte: Forest production annual market analysis 2002 - 2004, Organização de Nações Unidas (ONU)	8
Tabela 2.4 –	Distribuição da produção brasileira de pasta de celulose por estados no ano 2002 Fonte: BRACELPA (2003)	16
Tabela 2.5 –	Resíduos sólidos de fábricas brasileiras de pasta de celulose Kraft, 1995/1996 Adaptado: Alberto C. O. Filho <i>et al</i> (1997), 30º congresso anual de celulose e papel pág 448	17
Tabela 3.1 –	Limites de consistência e índice de plasticidade dos solos arenoso e argiloso lateríticos	33
Tabela 3.2 –	Classificação Unificada, HRB e resultados dos ensaios MCT dos solos	33
Tabela 3.3 –	Características da cal cálcica, Supercal CH-III	34
Tabela 3.4 –	Misturas ensaiadas para cada tipo de solo. Nota: As misturas de 1 a 6 e de 7 a 12 foram compostas com os solos arenoso e argiloso lateríticos respectivamente	35
Tabela 4.1 –	Massa específica seca máxima e umidade ótima das misturas de resíduo e solo, sem adição de cal, obtidas nos ensaios preliminares	47
Tabela 4.2 –	Massa específica seca máxima e umidade ótima dos solos, das misturas de resíduo e solo e das misturas de resíduo solo e cal	49
Tabela 4.3 –	Resistência à compressão simples imediata dos solos, misturas de solo e cal e misturas de solo, resíduo e cal	56
Tabela 4.4 –	Resistência à compressão simples dos solos, misturas de solo e cal e misturas de solo, resíduo e cal Nota: Tempo de cura 7 dias	59

Tabela 4.5 – Resistência à compressão simples aos 0, 3, 7 e 28 dias de cura	62
Tabela 4.6 – Resistência à tração indireta dos solos, misturas de solo e cal e misturas de solo, resíduo e cal Nota: Tempo de cura 7 dias	65
Tabela 4.8 – Valores de coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) dos solos puros, solos com cal, e solos com resíduo e cal	72
Tabela 4.9 – Valores de CBR e expansão para solos, misturas de solo e cal e misturas de solo, resíduo e cal Nota: Tempo de cura 7 dias	76
Tabela 4.10 – Índice de Suporte Califórnia e expansão aos 7, 14 e 28 dias de cura	80
Tabela 4.11 – Influência das variáveis do estudo sobre a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura	86
Tabela 4.12 – Influência das variáveis do estudo sobre a resistência à compressão diametral aos 7 dias de cura	86
Tabela 4.13 – Influência das variáveis do estudo sobre o CBR aos 7 dias de cura	87
Tabela 4.14 – Influência do tipo de solo e tempo de cura nas resistências à compressão simples e compressão diametral	88
Tabela 4.15 – Elementos químicos inorgânicos constituintes do resíduo, da mistura de resíduo e solo e da misturas de resíduo, solo e cal	93
Tabela 4.16 – Variação relativa do teor de elementos químicos inorgânicos entre o resíduo puro e os cristais dos corpos-de-prova com e sem adição de cal	94

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADT	Air Dry Tonn (Tonelada de pasta seca ao ar)
BRACELPA	Associação Brasileira de Celulose e Papel
CBR	California Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia)
c.p.	Corpo-de-prova
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DRX	Difração de Raios-X
ECC	Equivalente de Carbonato de Cálcio
EPA	Environmental Protection Association
ETE	Estação de tratamento de efluentes
Finnra	Finnish Road Administration
HRB	Highway Research Board
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MEV	Microscopia Eletrônica Por Varredura
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira Registrada
ONU	Organização de Nações Unidas
PAHs	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
RCS	Resistência à Compressão Simples
RCD	Resistência à Compressão Diametral
RTR	Road Transport Research
SP	São Paulo
TRB	Transportation Research Board
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Ângulo de atrito interno
SC	Areia Argilosa (Classificação unificada)
CL	Argila Siltosa (Classificação unificada)
c	Coesão
s	Desvio padrão
pH	Escada de 0 a 14 que mede a acidez ou alcalinidade
α	Grau de confiança
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
R^2	Coeficiente de determinação
IP	Índice Plástico
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
ρ_{dmax}	Massa específica seca máxima
$\bar{Y}$	Média dos resultados
NP	Não plástico
N	Número de repetições do ensaio
ML	Silte de baixa compressibilidade (Classificação Unificada USCS)
LA'	Solo arenoso laterítico (Classificação MCT)
LG'	Solo argiloso laterítico (Classificação MCT)
A-4	Solo Siltooso (Classificação HRB)
A-7-6	Solo Argiloso (Classificação HRB)
ω_o	Umidade ótima

RESUMO

CHÁVEZ M. C. (2004). *Estudo do comportamento mecânico de misturas de resíduo da fabricação de papel e solo para utilização na construção rodoviária*. São Carlos 2004. 104p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

O resíduo sólido estudado na presente pesquisa é decorrente da associação de lama de calcário e *dregs* (expressão muito utilizada na indústria do papel, inclusive no Brasil, que poderia ser traduzida como 'borra'), materiais gerados na fabricação de papel. Tradicionalmente, este resíduo é depositado em aterros sanitários ou em áreas controladas. No entanto, a disponibilidade de espaços adequados para a disposição é pequena, e a conservação dos mesmos é muito dispendiosa, visto que apresentam riscos de contaminação para o ambiente e fauna circundantes. Assim, este tipo de solução não é mais visto como viável a longo prazo. Este trabalho tem como objetivo principal determinar, a partir de ensaios de laboratório, o comportamento mecânico de misturas constituídas com solos e o resíduo em destaque, visando a sua utilização na construção rodoviária. Foram compactados corpos-de-prova com e sem adição de resíduo na energia normal do Proctor, variando-se o tipo de solo, o teor de cal e o tempo de cura, e posteriormente foram submetidos a ensaios de compressão simples, compressão diametral e índice de suporte Califórnia. Complementarmente, foram realizados ensaios de difração de raios-X e microscopia eletrônica por varredura para determinar, respectivamente, a composição química e micro-estrutura do resíduo. Os resultados mostraram que a adição do resíduo da fabricação de papel aos solos não melhora as propriedades mecânicas das misturas compactadas, sendo necessária a utilização de um estabilizante, como a cal, para melhorar as más características. Porém para os solos estudados, as misturas de solo, resíduo e cal apresentaram melhor comportamento mecânico que as misturas de solo-cal, oferecendo uma solução factível para a utilização deste resíduo na construção rodoviária.

Palavras-chave: Resíduos, lama de calcário, *dregs*, pasta de celulose, papel, pavimento, disposição, reciclagem.

ABSTRACT

CHÁVEZ M. C. (2004). *Study of the mechanical behavior of paper mill wastes and soil mixtures for their utilization in road construction*. São Carlos 2004. 104p. Master in Science thesis. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

The solid waste studied in the present research results from the association of lime mud and dregs, these materials are generated during the paper manufacturing. Traditionally, this waste is disposed of either surface impoundment or landfills. However, there is limited appropriate land availability for these disposal practices, and its maintenance is costly, due to the present contamination risks for the surrounding environment and fauna. Therefore, this kind of solution is no longer seen as long term viable. This work has the main objective of studying, based on laboratory tests, the mechanical behavior of soils and the wastes in focus mixtures, seeking their utilization in road construction. Specimens with and without the addition of waste were compacted at the normal Proctor energy, varying the soil type, the lime rate and curing time, afterwards they were submitted to tests of unconfined compressive strength, indirect tensile strength and California bearing ratio. Complementary, tests of ray-X diffraction and spectrum electronic microscopy were executed to respectively determine the chemical composition and microstructure of the waste. The results showed that the addition of paper mill wastes to soils does not improve the mechanical properties of the compacted mixtures, being necessary the use of a stabilizer, such as lime, to improve its poor characteristics. However for the studied soils; the lime stabilized soils and the waste mixtures presented better mechanical behavior than the lime stabilized soils offering a feasible solution for the use of this waste in road construction.

Keywords: Wastes, lime mud, dregs, pulp, paper, pavement, disposal, recycling.

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS

Recentemente, sobretudo na última década, a maior conscientização ambiental e a conseqüente criação de leis mais rigorosas para a administração de resíduos e subprodutos de processos industriais têm feito que a disposição e armazenagem destes seja cada vez mais problemática e dispendiosa, razões pelas quais se têm procurado alternativas para o uso e reciclagem dos mesmos.

Assim, e cada vez mais, a reutilização de resíduos e subprodutos tem despertado o interesse da sociedade. A obtenção de materiais utilizáveis derivados destes produtos deve contribuir, de maneira crescente, para que indústrias minimizem ou mesmo solucionem o problema de seus efluentes.

A indústria de papel e pasta de celulose é uma das maiores poluidoras do mundo. Segundo o Canadian Environmental Protection (1991), esta é a terceira indústria mais poluidora da América do Norte, superada apenas pelas indústrias de produtos químicos orgânicos e de petróleo. Os maiores fabricantes de pasta de celulose do mundo são os Estados Unidos e o Canadá, que no ano de 2000 produziram, 57 e 26,4 milhões de toneladas, respectivamente (BRACELPA, 2001).

Na época, o Brasil ocupava o 7º lugar entre os maiores fabricantes de pasta de celulose do mundo, com uma produção de 7,5 milhões de toneladas. Entretanto, o ritmo de crescimento deste segmento industrial tem-se acelerado

muito no país. Em 2002 e 2003, o setor acusou taxas de crescimento de 8,2% e 13,5%, respectivamente. Neste último ano, foram fabricadas 9.104.190 toneladas do produto, e as indústrias do setor empregaram 100.000 pessoas, gerando 3,1 bilhões de dólares em exportações (BRACELPA, 2004).

Embora a produção de pasta de celulose do Brasil ainda seja menor que a de alguns países, aqui, a geração de resíduos sólidos é proporcionalmente maior. Segundo o estudo de uma comissão técnica da Associação Brasileira de Celulose e Papel (1997), a geração de resíduos sólidos nos Estados Unidos é de aproximadamente 50kg/ADT (quilogramas de resíduo por tonelada de pasta de papel seca ao ar), enquanto que no Brasil, esta cifra é de aproximadamente 150kg/ADT, portanto três vezes mais elevada.

Na indústria de fabricação de papel, os resíduos sólidos que mais se destacam, considerando-se o volume gerado, são: as cascas e serragem decorrentes da manipulação das árvores para a obtenção da pasta base; as cinzas originadas da queima de parte das cascas e serragem para a produção de energia; os lodos formados na estação de tratamento de efluentes; a lama de calcário¹ e os *dregs*², sendo que estes últimos são resíduos obtidos durante o processo de recuperação da lixívia³ utilizada no cozimento da madeira para a extração da lignina e a conseqüente separação das fibras de celulose.

A legislação ambiental brasileira determina que os resíduos sólidos gerados durante o processo de fabricação da pasta de celulose devem ser eliminados apropriadamente. Tradicionalmente, estes resíduos são depositados em aterros sanitários ou em áreas controladas. Porém, a disponibilidade de espaços adequados para a disposição é pequeno, e a

¹ **Lama de calcário (CaCO_3):** Resultado da reação da cal virgem (CaO) e carbonato de sódio (Na_2CO_3) utilizados no processo de recuperação dos elementos químicos de cozimento da madeira.

² ***Dregs*:** Material não dissolvido na lixívia verde, consiste em carbono (50% ou mais) e materiais inertes (sobretudo carbonatos metálicos insolúveis, sulfatos, sulfetos, hidróxidos e silicatos).

³ **Lixívia:** Solução resultante da dissolução dos constituintes solúveis de uma matéria pela ação de ácidos, bases ou solventes.

conservação dos mesmos é muito dispendiosa, visto que apresentam riscos de contaminação para o ambiente e fauna circundantes. Assim, este tipo de disposição não é mais vista como uma solução viável a longo prazo.

Entre as propostas para o aproveitamento de alguns desses resíduos, destaca-se o seu emprego na agricultura: os lodos primário e secundário⁴ são utilizados como adubo devido a seu alto teor de material orgânico e por conter nutrientes, e as cinzas, lama de calcário e *dregs* são utilizados para melhorar as características e corrigir o pH do solo. No entanto, essas aplicações absorvem apenas uma pequena parcela dos resíduos e não se utilizam todos os tipos de resíduos gerados no processo de fabricação da pasta de celulose.

Segundo a organização não governamental canadense Reach for Unbleached (1997) interessada na redução da poluição gerada pela indústria de papel, os resíduos da fabricação da pasta de celulose contêm metais pesados nocivos à saúde, como o cádmio, cobre, molibdênio, níquel e zinco. As respectivas concentrações são, na maioria das vezes, inferiores às permitidas pelas normas de proteção ambiental do país, mas mesmo assim, estes resíduos só podem ser utilizados no cultivo de produtos não comestíveis.

Além de metais pesados, outro limitante para a utilização destes resíduos na agricultura é a presença de dioxinas e PAHs (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos), que são considerados cancerígenos a partir de certos níveis de concentração.

A construção civil, com destaque para a área rodoviária, pelos grandes volumes de materiais consumidos, configura-se como uma alternativa muito promissora para a utilização de resíduos industriais como solução capaz de aliviar os impactos ambientais causados pelos mesmos e ainda contribuir para a minimização da exploração de materiais naturais utilizados na construção dos pavimentos. Neste sentido, são conhecidas as propostas do emprego de

⁴ **Lodos primários e secundários:** São os resíduos sólidos obtidos do tratamento de efluentes nos fundos das lagoas de decantação, compostos principalmente por matéria orgânica, areias, fibras e minerais.

resíduos das indústrias do aço, adubos, fundição e outros produtos descartados como os pneus na construção rodoviária. Entretanto, são poucos os relatos sobre propostas para a utilização de resíduos da indústria do papel nesta área, distinguindo-se apenas as pesquisas de LAHTINEN *et al.* (2001) e ZHOU *et al.* (1999) que estudaram, respectivamente, o emprego de lama de calcário com cinzas de madeira e lodos na composição de materiais para bases de pavimentos. No Brasil, não se tem notícia de estudos sobre o uso de resíduos da produção de papel na construção rodoviária.

1.2 OBJETIVO

A presente pesquisa tem como objetivo principal determinar, a partir de ensaios de laboratório, o comportamento mecânico de misturas constituídas com dois diferentes solos e resíduo da fabricação de papel, visando a sua utilização na construção rodoviária.

O resíduo escolhido para a composição da mistura é decorrente da associação de lama de calcário e *dregs*, materiais gerados na produção de pasta de celulose e papel numa indústria localizada no interior paulista.

Para se alcançar o objetivo proposto, foram observadas as seguintes etapas:

- caracterização do resíduo e dos solos quanto às suas propriedades físicas e químicas;
- obtenção da quantidade máxima trabalhável de resíduo possível de ser incorporada à mistura;
- estudo do efeito estabilizante da cal na mistura;
- realização de ensaios de compactação, compressão simples, compressão diametral e CBR;
- análise do comportamento mecânico da mistura no tocante à sua composição e tempo de cura.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi desenvolvido na forma de dissertação de mestrado, estando dividido em cinco capítulos. O primeiro é a presente introdução e os quatro restantes foram organizados da seguinte maneira:

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, destacando-se os aspectos mais relevantes para o desenvolvimento da pesquisa. São abordados os processos de produção da pasta de celulose, do papel e informações a respeito da origem dos resíduos gerados.

O capítulo 3 descreve a caracterização dos materiais (solos, resíduo e cal), os critérios para a escolha da composição das misturas, os procedimentos de preparação dos corpos-de-prova, a descrição dos ensaios utilizados na determinação das propriedades mecânicas e o método de análise usado na interpretação dos resultados dos ensaios.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos a partir dos ensaios de laboratório, com destaque para o máximo teor trabalhável de resíduo nas misturas, a influência do tipo de solo e da adição da cal e o efeito do tempo de cura. Além disto, discute-se também a micro-estrutura e a composição química do resíduo e das misturas.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados laboratoriais e recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

A invenção do papel é creditada aos chineses e remonta ao ano 105 a.C. Não foi até muitos séculos depois que a fabricação de papel disseminou-se ao norte de África e na Europa. Segundo Biermann (1999), só em 1796 foi desenvolvida, na França, a primeira máquina para a produção de papel. Após a máquina de papel, a quantidade deste produto que podia ser fabricada viu-se limitada pelo suprimento de fibras, até então obtidas do algodão. Apenas em 1850 foi desenvolvida a tecnologia para extrair fibras a partir da madeira, as quais eram separadas e transformadas mediante processos físicos produzindo a "pasta mecânica de celulose". Em 1854, foi descoberto na Inglaterra um processo de produção de pasta através de tratamento da madeira com produtos químicos, surgindo então a primeira "pasta química de celulose".

Graças à utilização da madeira, o papel foi convertido de um artigo de luxo e baixa produção, num bem produzido em grande escala, a preços acessíveis, garantindo-se ainda uma elevada qualidade, porém com uma preocupante geração de resíduos.

Os resíduos gerados na fabricação da pasta de celulose representam grandes volumes e uma preocupação crescente na atualidade. As **tabelas 2.1 e 2.2** apresentam, respectivamente, os maiores produtores e consumidores de pasta de celulose e papel do mundo. Segundo a BRACELPA (2001), o Brasil está situado na 7º posição entre os maiores produtores de pasta de celulose e na 11º posição na produção de papel. Entretanto, nosso país mostra índices

de crescimento maiores que outros países, por seu grande potencial de matéria prima, garantido por suas boas condições ambientais e reservas florestais.

Tabela 2.1 – Maiores produtores e consumidores de pasta de celulose no ano 2000 (em mil toneladas)

Pais	Produção	Consumo[*] Aparente
1. Estados Unidos	57.002	58.153
2. Canadá	26.411	15.765
3. China	17.150	20.489
4. Finlândia	11.910	10.308
5. Japão	11.517	14.362
6. Suécia	11.399	8.744
7. Brasil	7.463	4.870
8. Rússia	5.782	4.327
9. Indonésia	4.089	3.342
10. França	2.469	4.342
Total	188.684	189.008

Fonte: BRACELPA (2001)

* Consumo aparente: Produção + importações – exportações

Tabela 2.2 – Maiores produtores e consumidores de papel no ano 2000 (em mil toneladas)

Pais	Produção	Consumo Aparente
1. Estados Unidos	85.495	92.355
2. Japão	31.828	31.736
3. China	30.900	36.277
4. Canadá	20.689	7.476
5. Alemanha	18.182	19.112
6. Finlândia	13.509	1.829
7. Suécia	10.786	2.494
8. França	9.991	11.376
9. Itália	9.000	10.942
10. Coreia do Sul	9.308	7.385
11. Brasil	7.172	6.774
Total	323.295	323.378

Fonte: BRACELPA (2001)

A **tabela 2.3** apresenta os valores de produção e consumo aparente de pasta de celulose em 2001 e 2002. Nesta tabela observa-se que a variação da produção no Brasil é maior que a variação de outros importantes produtores de pasta de celulose do mundo. Ainda, segundo últimos dados da BRACELPA, a produção no Brasil em 2003 foi 9.104.190 toneladas, alcançando um crescimento de 13,5% em relação ao ano 2002.

Tabela 2.3 – Produção e consumo aparente de pasta de celulose nos anos 2001 e 2002

	Produção		Variação	Consumo aparente		Variação
	2001	2002		2001	2002	
Estados Unidos e Canadá	78.790	79.313	0,66%	68.823	68.675	-0,22%
União Européia	36.186	37.306	3,10%	42.528	43.674	2,69%
Resto de Europa	3.387	3.340	-1,39%	4.093	4.106	0,32%
Rússia	6.152	6.414	4,26%	4.400	4.591	4,34%
Brasil	7.415	8.021	8,17%	4.900	4.944	0,8%

Fonte: Forest production annual market analysis 2002 - 2004, Organização de Nações Unidas (ONU)

As exportações da pasta de celulose também vêm crescendo aceleradamente, em 2002 o Brasil exportou 3.450.000 toneladas e em 2003 exportou 4.500.000 toneladas, alcançando um aumento de 30,4%. O programa de investimento do setor de celulose e papel para o período 2003 a 2012, no valor de US\$14,4 bilhões, pretende ampliar a capacidade produtiva e aumentar as exportações do setor (BRACELPA, 2003).

2.2 PRODUÇÃO DE PASTA DE CELULOSE E PAPEL

Denomina-se pasta de celulose às fibras de celulose obtidas a partir da madeira, separadas da matriz de lignina que as mantém juntas através de:

Processos químicos: dependem de soluções químicas (lixívias) para separar as fibras da madeira da lignina. Estes resultam numa melhor

qualidade de pasta, porém com um menor rendimento de transformação (40 a 50%);

Processos mecânicos: dependem de ações físicas para separar as fibras da madeira da lignina. Estes resultam numa pasta de qualidade inferior, porém o rendimento de transformação é maior (90 a 95%), razão pela qual estes processos estão ganhando novo fôlego, sendo os mais utilizados, por exemplo, na reciclagem de papel.

Há dois tipos principais de madeira utilizados na produção de papel: madeira branda de fibra longa, fornecida por coníferas (como o pinheiro) e madeira dura de fibra curta, fornecida por folhosas (como o eucalipto). Do ponto de vista da resistência, a madeira branda é a preferida, justamente por ter fibras longas que tornam a pasta mais resistente.

Para se iniciar a produção do papel, parte-se de uma suspensão diluída de pasta de celulose, obtida por processos químicos ou mecânicos, a qual, depois de receber os aditivos adequados, alimenta o conjunto de máquinas, mecanismo complexo que se divide em duas seções principais:

- Seção úmida: a pasta de celulose é depositada sobre uma rede metálica movimentada por rolos (**figura 2.1**). Durante este processo a pasta vai perdendo água por gravidade e posteriormente por sucção (produzida por cilindros aspiradores);
- Seção seca: nesta seção procede-se à secagem do papel por meio de cilindros giratórios aquecidos com vapor de água a baixa pressão. Neste processo, a folha perde até 70% da sua água.

Posteriormente, enrola-se o papel em bobinas que são enviadas às fábricas de produtos de papel, para sua conversão em produtos tais como: papelão, papel de impressão, papel sanitário etc.

Figura 2.1 – Seções da máquina de papel

Fonte: Essential of pulping and papermaking, p. 57

A pasta de celulose, necessária para produção de papel, pode ser gerada por processos químicos ou mecânicos. Entre os principais tipos de processos químicos para a produção de pasta, o mais difundido é o processo ao sulfato ou Kraft.

2.2.1 Processo Kraft ou processo ao sulfato

O processo Kraft é um processo totalmente químico que utiliza como lixívia de cozimento (lixívia branca) uma mistura constituída de hidróxido de sódio (NaOH), sulfeto de sódio (Na_2S) e pequenas quantidades de carbonato de sódio (Na_2CO_3). A mistura apresenta um pH acima de 12 e o processo desenvolve-se a uma temperatura que pode estar entre 160 e 180°C, por 3 a 5 horas, e deve dissolver a maior parte da lignina das fibras da madeira.

Deste processo de cozimento são obtidos a pasta de celulose utilizada para fabricar o papel e a lixívia negra. Esta lixívia negra é o rejeito do processo de extração da pasta, sendo composta pelos agentes químicos inorgânicos utilizados no processo e madeira degradada e dissolvida.

A lixívia branca não contém sulfato, porém o processo tecnológico recebe este nome porque o sulfato de sódio (NaSO_4) é utilizado depois do cozimento para regenerar a lixívia branca a partir da lixívia negra.

2.2.2 Seqüência de operações Kraft

A **figura 2.2** apresenta um fluxograma que mostra esquematicamente a seqüência de operações seguidas no processo ao Sulfato ou Kraft, descrito a seguir:

1. Primeiro são preparados os cavacos, retirando-se a casca da madeira e cortando-a em pedaços pequenos. As cascas não são utilizadas no processo de produção de pasta, porque seu branqueamento é difícil. Assim, são excluídas do processo, sendo depois utilizadas para geração de energia mediante combustão, originando quantidades significativas de cinzas;
2. Em seguida, dá-se entrada dos cavacos no digestor (caldeira de pressão onde é cozida a madeira para se obter a pasta), onde ficam em contato com a lixívia branca para a separação das fibras de celulose da lignina;
3. Segue-se com a lavagem e remoção de nós da madeira e dos pedaços mal digeridos. Esta lavagem é feita com água, em sistemas de crivagem centrífuga e de filtragem sob vácuo, dos quais a pasta sai adensada;
4. Após a extração da pasta, a lixívia negra proveniente deste processo é posteriormente reciclada para se recuperar a lixívia branca. Este processo é conhecido como recuperação química. Quando a pasta é destinada à fabricação de papel branco, esta é branqueada com dióxido de cloro (ClO_2);
5. Após o branqueamento, a pasta volta a ser lavada, secada, e armazenada para o abastecimento das máquinas de produção de papel.

Figura 2.2 – Processo para a obtenção da pasta de celulose

A recuperação química da lixívia branca a partir da lixívia negra é o processo em que os reagentes inorgânicos utilizados na extração da pasta são recuperados. Este processo apresenta as seguintes vantagens: 1) permite recuperar os reagentes inorgânicos de cozimento; 2) permite gerar grandes quantidades de calor através da queima da matéria orgânica. Esta energia é utilizada para gerar eletricidade; 3) permite reduzir a poluição do ar e água transformando os resíduos em produtos reutilizáveis ou menos danosos.

Na produção da pasta de celulose o processo de recuperação da lixívia branca é mais complexo do que a própria produção da pasta. A **figura 2.3** apresenta o processo de recuperação da lixívia branca. Como se pode observar, primeiro promove-se uma evaporação da lixívia negra que apresenta inicialmente, uma concentração de sólidos de 15% e ao final do processo alcança aproximadamente 65%.

Depois, na caldeira de recuperação, a lixívia negra concentrada é submetida à combustão, para fundir seus reagentes inorgânicos no denominado *smelt* e queimar seus reagentes orgânicos para gerar vapor que é convertido em eletricidade. O *smelt* é composto por sulfeto de sódio (Na_2S) e carbonato de sódio (Na_2CO_3). Nesta caldeira, sulfato de sódio (Na_2SO_4) é adicionado para gerar o sulfeto de sódio (Na_2S).

O processo químico na caldeira de recuperação para gerar o *smelt* pode ser esquematizado conforme o seguinte:

Conversão de sais de sódio: $2\text{NaOH} + \text{CO}_2 \Rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$;

Recuperação dos compostos químicos originais: $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{C} \Rightarrow \text{Na}_2\text{S} + 4\text{CO}$.

Posteriormente, o *smelt* é dissolvido em água, gerando a solução conhecida como lixívia verde.

Para finalmente obter-se a lixívia branca, procede-se à caustificação⁵ da lixívia verde. Assim, converte-se o carbonato de sódio (Na_2CO_3) em soda cáustica (NaOH) e carbonato de cálcio (CaCO_3), mediante adição de cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). O processo químico é o seguinte:

Hidratação da cal: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$;

Recuperação da soda cáustica: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \Leftrightarrow 2\text{NaOH} + \text{CaCO}_3$;

⁵ **Caustificação:** Processo para transformar os carbonatos dos metais alcalinos em hidróxidos. Consiste em aquecimento intenso e ressecante das substâncias dos carbonatos com cal extinta com o que precipita carbonato de cálcio.

Figura 2.3 – Processo de recuperação da lixívia branca a partir da lixívia negra

Este processo de recuperação da soda cáustica (NaOH), principal composto da lixívia branca, deixa como resíduo lama de calcário (carbonato de cálcio, CaCO_3) que é tratada num forno de alta temperatura para recuperar o óxido de cálcio (cal virgem), conforme o esquema apresentado a seguir:

Também no processo de caustificação são gerados *dregs*, resultantes da clarificação por sedimentação da lixívia verde, que misturados com parte da lama de calcário são dispostos em áreas controladas ou aterros sanitários.

Além das cinzas, lama de calcário e *dregs*, são gerados, também lodos, procedentes do tratamento de efluentes aquosos, que dependendo do processo ao qual são submetidos podem ser primários, secundários ou terciários. Os efluentes aquosos são submetidos a estes processos de forma consecutiva, com a finalidade de melhorar suas características para produzir a menor poluição possível quando descartados nos rios.

O volume de água descartada nos rios depende do tipo de pasta fabricada: para a fabricação de pasta mecânica são descartados de 20.000 a 25.000 litros por tonelada de pasta, enquanto para a fabricação de pasta química branqueada, descartam-se 120.000 litros por tonelada de pasta.

O lodo primário é a parte sólida dos efluentes obtida no fundo das piscinas de decantação, sendo composto por areias, fibras e minerais. Após o tratamento primário, os efluentes são submetidos a um tratamento biológico, formando o lodo secundário, mediante a transformação da matéria orgânica solúvel presente nestes efluentes através da atividade da cultura biológica. Finalmente, depois do tratamento secundário, o lodo terciário é gerado através de precipitação química que tem a finalidade de reduzir a turbidez da água.

Os lodos primários e secundários podem ser utilizados para a agricultura como adubo ou ser depositados, igualmente aos lodos terciários, em áreas controladas ou aterros sanitários.

2.2.3 Processo mecânico

Este processo consiste em atritar a madeira contra discos de metal giratórios, em presença de água. O calor produzido pelo atrito faz que a água aqueça e amoleça a lignina, permitindo que as fibras de celulose separem-se facilmente. Depois, as fibras são conduzidas a um adensador, originando a

pasta mecânica. A água liberada neste processo é, após filtragem, usada novamente para extração das fibras.

Este processo é utilizado na obtenção de pasta destinada para papelão e papel de baixa qualidade. Normalmente, para melhorar a resistência do produto e controlar a sua cor, a pasta mecânica é misturada com a pasta química gerada no processo Kraft, permitindo assim o seu uso como papel para jornais.

O processo mecânico tem um maior rendimento de transformação, porém, em 2002, só representava 6,18% da produção de pasta de celulose no Brasil. A **tabela 2.4** apresenta as quantidades produzidas por tipo de pasta e por estados no Brasil. Nesta tabela observa-se que o estado de São Paulo concentra 29% da produção de pasta química e a conseqüente geração de resíduos sólidos.

Tabela 2.4 – Distribuição da produção brasileira de pasta de celulose por estados no ano 2002

Estado	Pasta química			Participação	Pastas mecânicas
	Fibra longa	Fibra curta	Total		
São Paulo	92.681	2.089.150	2.181.831	29,0%	-
Espírito Santo	-	1.656.048	1.656.048	22,0%	-
Santa Catarina	831.208	34.427	865.635	11,5%	-
Minas Gerais	-	830.813	830.813	11,0%	-
Paraná	477.205	225.274	702.479	9,3%	-
Bahia	-	593.479	593.479	7,9%	-
Rio Grande do Sul	27.431	297.413	324.844	4,3%	-
Pará	-	290.365	290.365	3,9%	-
Maranhão	53.821	-	53.821	0,7%	-
Pernambuco	26.382	-	26.382	0,4%	-
Total			7.525.697	100%	495.398

Fonte: BRACELPA (2003)

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS: LAMA DE CALCÁRIO E DREGS

O resíduo da produção de pasta de celulose estudado neste trabalho é uma mistura de lama de calcário e *dregs*, que é depositada em áreas controladas de resíduos ou aterros sanitários.

Estes resíduos são importantes quanto aos volumes de produção, como se observa na **tabela 2.5**, que apresenta quantidades de resíduos sólidos produzidos nas fábricas do Brasil por tonelada de pasta de celulose seca ao ar produzida.

Tabela 2.5 – Resíduos sólidos de fábricas brasileiras de pasta de celulose Kraft, 1995/1996

Tipo de resíduo	Fonte geradora	Volume específico Kg/ADT	Destino final
Cascas	Pátio de madeira	30,86–40,43	Aterro / Floresta
Cinzas	Caldeiras	14,23–30,22	Aterro / Floresta
Dregs	Caustificação	14,30–30,22	Aterro / Reciclagem
Grits	Caustificação	2,93–7,34	Aterro / Reciclagem
Lama de Calcário	Caustificação / Forno de cal	28,62–53,83	Aterro / Floresta
Resíduo Doméstico	Geral	3,46–3,72	Aterro / Reciclagem
Lodo de ETE	Tratamento de efluentes	21,56–29,40	Aterro / Florestas
Outros	Entulhos / Rejeitos, etc.	5,85–12,07	Aterro / Doação
Total	-	127,81–181,21	

Adaptado: Alberto C. O. Filho *et al* (1997), 30º congresso anual de celulose e papel pág 448

Segundo ensaios de lixiviação, solubilização e amostra bruta realizados na indústria de papel que proporcionou os resíduos, a mistura de lama de calcário e *dregs* é um resíduo classe II (resíduo não inerte) segundo a norma

NBR 10.004 (Resíduos sólidos). Esses resultados apresentam-se de forma detalhada no anexo 4.

O ensaio realizado com amostra lixiviada foi executado segundo a norma da ABNT NBR 10.005 e os parâmetros analisados apresentaram concentrações inferiores aos limites de quantificação indicados na listagem N°7 da NBR 10.004.

O ensaio realizado com amostra solubilizada foi executado segundo a norma da ABNT NBR 10.006 e os parâmetros Sódio, Cianeto e Nitrato foram superiores aos limites de quantificação indicados na listagem N°8 da NBR 10.004.

Finalmente, o ensaio realizado com a massa bruta foi executado segundo a norma da ABNT NBR 10.007 e os parâmetros analisados apresentaram concentrações inferiores aos limites de quantificação indicados na listagem N°9 da NBR 10.004.

Outro parâmetro apresentado nestes ensaios é o pH da mistura de lama de calcário e *dregs*, que para o material solubilizado é de 12,6 e para a amostra bruta é de 11, o que indica um material altamente alcalino.

2.3.1 Lama de calcário

A lama de calcário é um resíduo principalmente conformado por carbonato de cálcio e pequenas quantidades de hidróxido de cálcio, magnésio e sódio obtido da produção da celulose na etapa de caustificação. É produto do tratamento da lixívia verde com cal hidratada.

A lama de calcário, como se observou na **figura 2.3** (página 15), sai do clarificador de lixívia branca, apresentando um teor de sólidos de 35% a 40%. Posteriormente, é submetida a lavagem com o objetivo de recuperar todo o hidróxido de sódio e dióxido de sódio (15% a 20% da lama de calcário) antes de enviá-la ao forno de calcinação para produzir cal. Quando a lavagem é

efetuada corretamente, menos de 1% de dióxido de sódio, em relação à massa seca de lama de calcário, permanece nela. Depois da lavagem, a lama de calcário é concentrada até atingir um teor de sólidos de 55% a 75%. Parte da lama de calcário obtida neste processo alimenta o forno de cal, enquanto outra parte elimina-se junto com os *dregs* em áreas controladas de rejeitos. Na **figura 2.4** apresenta-se a lama de calcário, sem adição de *dregs*.

Figura 2.4 – Lama de calcário na condição natural

Alguns resultados encontrados da granulometria da lama de calcário indicam que as diferenças entre os processos das indústrias e os materiais resultam em diferentes tamanhos de partículas desta. Simson *et al.* (1981), fizeram um estudo com lama de calcário, que continha 94% de CaCO_3 , e encontraram que 100% dos grãos passavam pela peneira N°100 (0,149mm), entretanto outro estudo similar reportou que só 88% dos grãos passavam pela peneira N°100.

Outro índice importante, sobre tudo para a agricultura, é o Equivalente de Carbonato de Cálcio (ECC), que expressa a capacidade do material utilizado para neutralizar o pH em relação ao carbonato de cálcio puro. A lama de calcário tem um ECC que varia entre 91% e 109%.

Como a maior parte dos lodos da produção de pasta de celulose, a lama de calcário tem sérios problemas de disposição, apresenta um alto teor de umidade que a faz instável e propensa a deslocamentos quando mantido em aterros sanitários (PETERS, 1998).

2.3.2 Dregs

Os *dregs* são substâncias insolúveis, obtidas na clarificação da lixívia verde, e ocorrem em pequena quantidade (5,5 kg/ADT). Este resíduo é 0,1% da lixívia verde e consiste, segundo Biermann (1993), em carbono (50% ou mais) e outros materiais (metais insolúveis, carbonetos, sulfatos, sulfetos, hidróxidos e silicatos). Segundo Philipp (1998), os *dregs* apresentam maiores concentrações de sódio que os outros resíduos da produção da pasta de celulose, contendo de 25mg a 90mg de sódio por kg. É um material denso e de cor preto.

Os *dregs* depois de separados da lixívia verde por decantação são submetidos a lavagem, após a qual apresentam uma concentração de sólidos de 10% e levam muitos sais de sódio dissolvidos em seu fluxo. Para a recuperação destes sais usa-se o lavador de *dregs*, unidade do processo que compreende sucessivos estágios de diluição e decantação. Após a lavagem, os sólidos (*dregs*) são bombeados para fora do sistema e depositados junto com a lama de calcário no pátio de resíduos.

Os *dregs*, assim como a lama de calcário, são utilizados na agricultura para corrigir o pH do solo e apresentam um valor de Equivalente de Carbonato de Cálcio (ECC) que varia entre 80 e 120%. Porém seu uso se vê limitado por seu teor de sódio, magnésio e outros metais pesados.

2.4 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE PASTA DE CELULOSE NA CONSTRUÇÃO CIVIL E RODOVIÁRIA

Nas últimas décadas, o aumento de quantidades geradas de resíduos industriais e a diminuição de espaços adequados para aterros sanitários ou disposição de resíduos, assim como os efeitos ambientais de sua disposição e a procura de materiais de construção melhores e mais baratos, têm feito que se procure reutilizar resíduos industriais visando soluções técnicas, econômicas e ambientalmente competitivas.

A construção rodoviária oferece boas oportunidades para reciclar resíduos industriais, mas não deve servir como um "aterro sanitário longitudinal". A reciclagem de resíduos industriais está crescendo em vários países e vai continuar aumentando, enquanto pesquisas e novas tecnologias aumentarem as oportunidades. Em algumas ocasiões, reciclar resíduos industriais oferece produtos melhores que os materiais virgens. Porém, é extremamente importante avaliar estes materiais, para assegurar que os resíduos utilizados tenham um desempenho aceitável. (RECYCLING STRATEGIES FOR ROAD WORKS, RTR 1997).

A disposição de resíduos vêm-se tornando uma grande preocupação, e a redução, reutilização e reciclagem de materiais residuais tem-se convertido num objetivo global. Muitos dos resíduos industriais que atualmente são acumulados, causando danos ambientais consideráveis, poderiam ser reciclados na construção civil, aliviando a sua nocividade, reduzindo a utilização de materiais escassos na natureza e permitindo utilizar materiais regionalizados de modo a diminuir o dispêndio com transportes a longa distância.

Em muitos países, tem-se tornado muito importante que materiais recicláveis possam ser reutilizados, sem representar uma ameaça ambiental e considerando o bem estar do trabalhador.

Atualmente, a disposição de resíduos produzidos na fabricação de pasta de celulose é realizada em aterros sanitários, queima ou em áreas controladas destinadas ao acúmulo de resíduos. Estas práticas têm muitas conotações ambientais negativas, podendo provocar contaminação do ar, solo e água.

O estudo a respeito do uso de resíduos da indústria do papel na construção rodoviária ainda é incipiente, limitando-se a poucas publicações, tais como Lathinen (2001) e Zhou (1999).

Zhou (1999) realizou uma pesquisa para determinar as propriedades químicas e mecânicas de misturas de solos com lama de calcário e solos com cinza volante, com o objetivo de aplicá-las na conformação de camadas de base e sub-base. Determinou que a resistência das misturas com solos finos aumentava aproximadamente 100% em relação ao comportamento dos solos isoladamente.

Nesta experiência, os teores ótimos de resíduo encontrados foram de 10% e os solos que obtiveram o maior benefício eram aqueles com maiores teores de finos, visto que a lama de calcário (CaCO_3) teria um efeito similar ao da cal hidratada (Ca(OH)_2).

Nesta pesquisa Zhou (1999) estudou também as influências do tempo de cura e da umidade de compactação no comportamento das misturas, determinando que tempos de cura maiores e teores de umidade menores à ótima aumentavam a resistência à ruptura das misturas.

Ainda neste estudo, Zhou (1999) analisou a toxicidade dos materiais (lama de calcário e cinzas), determinando que, a curto prazo, estes podem ser classificados como materiais não perigosos, se medidas forem tomadas para manter o pH abaixo de 12,5. A longo prazo, os ensaios mostraram que as concentrações de metais nocivos eram menores que as permitidas pelos regulamentos ambientais vigentes.

Uma publicação da Finnish Road Administration (Finnra) apresentou pesquisa desenvolvida por Lathinen (2000) com cinza volante proveniente da queima de cascas e serragem da produção de papel. O estudo afirmou que a cinza de madeira tem a mesma ou maior qualidade que a cinza de carvão mineral que está sendo amplamente estudada para aplicação na construção rodoviária.

Nesta pesquisa foram realizados ensaios em laboratório e em escala natural, encontrando-se que a cinza volante pode ser utilizada para estabilizar solos, melhorando sua resistência e estabilidade.

Ainda neste estudo foram analisadas misturas de solo, lodo (resíduo da fabricação de papel com alto teor orgânico) e cinza volante, encontrando bons resultados, embora o lodo isoladamente seja um material de baixa resistência às cargas do tráfego veicular e às solicitações ambientais.

Além das pesquisas realizadas visando aproveitar os resíduos da fabricação da pasta de celulose na construção de estradas, alguns estudos foram desenvolvidos procurando tecnologias para utilizar estes resíduos em outros campos da construção civil. No entanto, essas práticas não estão possibilitando a absorção de volumes expressivos dos resíduos produzidos, exigindo-se que novas alternativas que consumam maiores volumes e variedades de resíduos sejam encontradas.

Existem pesquisas já desenvolvidas ou atualmente em curso, visando determinar características físicas e químicas dos resíduos gerados pela indústria de papel e assim possibilitar novas aplicações que permitam o aproveitamento dos mesmos.

Moo-young & Zimmie (1996) apresentaram resultados de pesquisa realizada com o objetivo de determinar as propriedades geotécnicas dos lodos para sua utilização como cobertura de aterros sanitários. Dentre as conclusões obtidas nesta pesquisa destacam-se:

- Os lodos apresentam teor de umidade elevado: dentre as sete amostras ensaiadas, os teores variaram entre 150 e 268%;
- alta compressibilidade;
- elevados limites de Atterberg: o limite de liquidez (LL) variou entre 220-297% e o limite de plasticidade (LP) de 94-147%;
- grande quantidade de fibras orgânicas;
- o ângulo de atrito interno varia de 25 a 40° e a coesão de 2,8 a 9kPa;
- baixa permeabilidade, portanto eficiente para evitar a percolação nos aterros sanitários;

- o congelamento e descongelamento incrementam a permeabilidade do lodo.

A aplicação de lodos na construção civil também foi estudada e os resultados apresentados na dissertação de mestrado intitulada "Utilização de resíduos da indústria de papel na produção de materiais para a construção civil", elaborada por Nolasco (1993). Neste trabalho caracterizou-se o resíduo nos seus aspectos físicos, químicos, ambientais e econômicos, sendo destacados possíveis usos para o mesmo, ou seja:

- enchimento de blocos vazados cerâmicos ou de concreto, para melhorar o comportamento termo-acústico destes componentes;
- utilização em lajes com a finalidade de caixão perdido, por tratar-se de um material leve, resultando em alívio da carga na estrutura e na fundação;
- sobre lajes e sob contra-piso para absorver o ruído e impacto gerado por passos no piso superior;
- enchimento para pisos flutuantes constituídos por placas armadas de concreto;
- enchimento para paredes sanduíches e paredes compostas, tais como: placas de gesso ou placas de argamassa armada.

2.5 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO PAPEL NA AGRICULTURA

Um dos destinos alternativos importantes para os resíduos é a sua utilização na agricultura. Cinzas, lama de cal e *dregs* servem para corrigir o pH dos solos e lodos primários e secundários são utilizados como adubo, gerando benefícios ao se juntar materiais organicamente ricos aos solos. No entanto, para a utilização dos resíduos da fabricação do papel existem restrições devido a serem gerados através de processos químicos e pelo fato de existirem entre seus componentes metais pesados e outros compostos que podem ser nocivos à saúde.

Segundo a Reach for Unbleached (1997), os resíduos da fabricação do papel contém metais pesados como: cádmio, cobre, molibdênio, níquel e zinco, além de conter dioxinas e PAHs (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos), que são considerados cancerígenos.

O teor desses compostos nos resíduos da fabricação de papel é menor que os limites estabelecidos nas leis de proteção à saúde, mas mesmo assim esses resíduos têm as seguintes limitações para sua utilização na agricultura: só podem ser utilizados como adubo em culturas onde se cultivem produtos não comestíveis e devem ser utilizados em quantidades limitadas. Por isso, a agricultura só pode absorver uma pequena parcela dos volumes de resíduos gerados.

2.6 UTILIZAÇÃO DA CAL COMO ESTABILIZANTE

Muitos resíduos não podem ser empregados sozinhos devido a sua baixa capacidade de suporte. Entretanto, segundo Lahtinen (2001), misturas desses resíduos com estabilizantes, como a cal, fosfogesso ou cimento podem resultar num material adequado, que apresente propriedades vantajosas como as seguintes:

- resistência contra grandes deformações;
- boa capacidade contra o congelamento;
- boa capacidade de retenção de água;
- baixo peso;
- boa capacidade de suporte;
- trabalhável e fácil de construir.

A cal hidratada (comercial) tem sido amplamente estudada em todo o mundo pelos efeitos favoráveis que tem no comportamento de solos com altos teores de finos. Quando se adiciona cal a uma mistura ocorrem várias reações, entre as quais podemos considerar:

- A permuta iônica e floculação, na qual verifica-se uma diminuição da plasticidade devido à troca iônica pela qual os cátions Ca^{++} (produzidos devido à adição da cal) vão adsorver-se à superfície das partículas, diminuindo sua eletronegatividade, originando floculação (aglomeração das partículas) e produzindo uma imediata melhora na plasticidade, trabalhabilidade e resistência sem cura;
- A reação pozolânica, que é uma reação lenta que se produz em meios de pH elevado, onde a solubilidade da sílica e alumina são incrementadas e combinam-se com Ca^{++} para formar silicato de cálcio, melhorando a resistência da mistura compactada e sua estabilidade;
- A carbonatação, que é a combinação de óxido ou hidróxido de cálcio com anidrido carbônico presente nas minúsculas bolhas de ar, absorvidas na mistura do solo com a cal. A reação tende a refazer o carbonato original, visto que a decomposição desse composto pelo calor é uma reação reversível. Desse fato resulta a ação cimentante da cal, porque ela faz aparecer um novo corpo sólido que trava e firma as partículas do solo (GUIMARÃES, 1971).

2.6.1 Efeitos da cal sobre as misturas

De modo geral, a cal sempre afeta favoravelmente as propriedades físicas dos solos. Existe um aumento do tamanho das partículas pelo fenômeno de troca iônica e aglomeração e uma conseqüente diminuição no índice de plasticidade. Um efeito significativo da adição de cal na mistura é uma redução brusca das suas propriedades de expansão, sendo que outra propriedade que se vê modificada é o pH do solo que passa gradativamente de ácido para alcalino.

A compactação de uma mistura produz, em geral, pela atuação da cal na textura, uma massa específica seca máxima menor e um teor de umidade ótimo maior. Isto não acontece sempre, tendo-se conhecimento de misturas que não apresentam estas características, segundo El-rawi & Awad (1981), o

aumento na umidade ótima deve-se à reação pozolânica e à diminuição ao intercâmbio catiônico, portanto, o balanceamento entre os dois efeitos pode resultar em pouca ou nenhuma mudança da umidade ótima e, conseqüentemente, pouca ou nenhuma mudança da massa específica seca máxima.

É importante destacar que a relação entre massa específica seca máxima e umidade ótima estão mudando constantemente e é importante usar a curva de compactação apropriada na construção em campo. Conseqüentemente, quando acontece tempo de cura, pode ser impossível alcançar a massa específica seca máxima. Porém, é importante notar que não é necessário alcançar essa massa específica, porque a redução não se deve a má compactação, mas ao fato de que o material é diferente (TRB, 1987).

Em relação às propriedades mecânicas das misturas, estas são normalmente avaliadas de várias formas: à compressão não confinada, que é o procedimento mais popular; com o índice de suporte Califórnia, que é utilizado com menos freqüência e definitivamente não é o ensaio mais aplicável ou desejável; ensaios de tração ou outros esforços, dos quais tem-se pouca informação e são necessários maior número de pesquisas para avaliar essas características de misturas com cal (TRB, 1987).

Deve-se enfatizar que as propriedades mecânicas dependem de muitos fatores: tipo de solo, tipo e teor da cal, condições e tempo de cura e a interação desses fatores, que afeta muito a resistência das misturas com cal.

Imediatamente após a adição de cal existe melhora nas propriedades mecânicas. Ensaio de CBR, compressão simples e cone de penetração mostram melhoras imediatas de várias vezes a resistência original (TRB, 1987).

A resistência das misturas aumenta com o tempo de cura, por força das reações físico-químicas que nelas ocorrem. Em geral, a resistência das misturas estabilizadas com cal aumenta rapidamente no período inicial, depois à medida que a cura progride a velocidade de aumento de resistência torna-se

cada vez menor. As reações pozolânicas, sendo lentas, fazem com que a resistência, ainda que muito lentamente, aumente após alguns anos de idade (GUIMARÃES, 1971).

2.6.2 Materiais calcários estabilizados com cal

Estudos têm sido publicados destacando o bom comportamento de materiais calcários (como o estudado na presente pesquisa) quando pequenos teores de cal hidratada são incorporados à mistura. A adição da cal hidratada em materiais calcários incrementa a resistência porque proporciona mais íons Ca^{++} solúveis, o que causa cimentação dos carbonatos (GRAVES, 1987).

Os ensaios realizados por Bhuiyan *et al.* (1995) mostram que as misturas estabilizadas com cal têm importantes ganhos de resistência frente às misturas não estabilizadas. Foi também observado que os ganhos de resistência são muito mais significativos para os materiais que apresentam importantes concentrações de calcita (CaCO_3).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve a caracterização dos materiais usados nesta pesquisa (resíduo, solos e cal), os critérios para escolha e composição da mistura, os procedimentos de preparação dos corpos-de-prova, a descrição dos ensaios utilizados na determinação das propriedades mecânicas dos materiais e o método de análise utilizado na interpretação dos resultados.

3.2 COLETA E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 Resíduo da produção de pasta de celulose

O resíduo da produção de pasta de celulose estudado consiste em uma mistura de lama de calcário e *dregs*, conforme definidos no **item 2.3**. O material foi coletado numa indústria de papel localizada no interior paulista. Na sua condição natural, conforme ilustrado na **figura 3.1**, o resíduo tem um teor de umidade aproximado de 70%.

Após a coleta e transporte, o resíduo foi seco ao ar até se alcançar teores de umidade inferiores a 20%. Depois da secagem, a amostra foi destorroada, passada pela peneira N°4 e homogeneizada por quarteamento. Depois, 150kg do material foram embalados em sacos plásticos e estocados para realização da pesquisa. Na **figura 3.2** observa-se o resíduo ao final do processo de secagem e homogeneização, apresentando uma cor cinza claro, sem odor particular, homogêneo, de grãos finos e esponjosos.

Figura 3.1 – Lama de calcário e *dregs* na condição natural na indústria de papel

Figura 3.2 – Lama de calcário e *dregs* após secagem e homogenização

3.2.2 Solos

Dois diferentes solos encontrados na região onde se localiza a indústria de papel foram coletados. No laboratório, os solos foram destorroados e passados pela peneira N°4 e em seguida homogeneizados por quarteamento e embalados em sacos plásticos. Aproximadamente 200kg de cada solo, na umidade higroscópica, foram estocados para realização da pesquisa.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.3.1 Resíduo da produção de pasta de celulose

3.3.1.1 Granulometria

A análise granulométrica foi realizada através do ensaio de granulometria conjunta, peneiramento e sedimentação, segundo a norma da ABNT NBR 7181 que inclui o uso padronizado de sete peneiras (2,0, 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15, e 0,075 mm). O defloculante utilizado foi o hexametáfosfato de sódio. A **figura 3.3** apresenta a curva granulométrica obtida. A granulometria do material corresponde à de um silte, com 96% passando na peneira N°200. Segundo a classificação unificada, o material seria equivalente a um silte de baixa compressibilidade (ML).

Figura 3.3 – Curva granulométrica do resíduo de pasta de celulose

3.3.1.2 Massa específica dos sólidos

A determinação da massa específica dos sólidos foi realizada segundo a norma da ABNT NBR 6508 e foi obtido o valor de $2,884 \text{ g/cm}^3$.

3.3.1.3 Limites de Atterberg

O ensaio para a determinação de limite de liquidez, segundo a norma da ABNT NBR 6459, foi considerado inexecutável devido a pasta de resíduo não apresentar a trabalhabilidade necessária para sua execução. No ensaio de limite de plasticidade, segundo a norma da ABNT NBR 7180, não foi possível a conformação dos cilindros, levando a classificar o resíduo como não plástico (NP).

3.3.2 Solos

3.3.2.1 Granulometria

A análise granulométrica foi realizada através do ensaio de granulometria conjunta, peneiramento e sedimentação, segundo a norma da ABNT NBR 7181. O defloculante utilizado foi o hexametáfosfato de sódio. A figura 3.4 apresenta as curvas granulométricas obtidas a partir deste ensaio.

Figura 3.4 – Curvas granulométricas dos solos arenoso e argiloso lateríticos

3.3.2.2 Massa específica dos sólidos

A determinação da massa específica dos sólidos foi realizada segundo a norma da ABNT NBR 6508 e foram obtidos os valores de $2,645\text{g/cm}^3$ e $2,711\text{g/cm}^3$ para os solos lateríticos arenoso e argiloso, respectivamente.

3.3.2.3 Limites de Atterberg

Os ensaios para a determinação de limite de liquidez, segundo a norma da ABNT NBR 6459 e limite de plasticidade segundo a norma da ABNT NBR 7180 têm os resultados apresentados na **tabela 3.1**.

Tabela 3.1 – Limites de consistência e índice de plasticidade dos solos arenoso e argiloso lateríticos

	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Arenoso laterítico (LA')	25	15	10
Argiloso laterítico (LG')	45	23	22

3.3.2.4 Classificação dos solos

Além dos ensaios de caracterização usados para classificar os solos pelos métodos Unificado e HRB, foram também realizados os ensaios preconizados na Norma DNER-CLA259-96 para a classificação MCT. A **tabela 3.2** apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3.2 – Classificação Unificada, HRB e resultados dos ensaios MCT dos solos

	Solo 1	Solo 2
Unificada	SC - Areia Argilosa	CL - Argila Siltosa
HRB	A-4 - Solo Siltoso	A-7-6 - Solo Argiloso
c'	1,15	1,85
d'	93,3	90,0
Pi	98,0	7,0
e'	1,061	0,664
MCT	LA' - Arenoso laterítico	LG' - Argiloso laterítico

3.3.3 Cal

A cal utilizada nos ensaios foi uma cal cálcica da marca Supercal, do tipo CH-III segundo a norma da ABNT NBR 7175. As características desta cal, segundo o fabricante, são apresentadas na **tabela 3.3**.

Tabela 3.3 – Características da cal cálcica, Supercal CH-III

Característica da matéria prima	Composição química	Caracterização granulométrica
Estrutura Microcristalina: romboédrica	Ca(OH) ₂ : 92,5% - 98.5%	D50 = 19,0
Origem: sedimentar marinha	MgO: 3,5% máx	D90 = 55,0
Massa específica dos grãos: 2,7g/cm ³	SiO ₂ : 0,3% máx	
Dureza Mohs de 3,0	R ₂ O ₃ : 1,5% máx	

Fonte: Ficha técnica do produto (CARBOMIL, 2003).

3.4 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS E ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

A composição das misturas de solo e resíduo foi determinada inicialmente com base na trabalhabilidade da mistura. Foram feitos ensaios de compactação normal para diversas composições de solo e resíduo, variando-se o teor de resíduo até se determinar o máximo teor que ainda garantiria a trabalhabilidade neste ensaio.

Os ensaios de compactação foram realizados na energia normal de compactação seguindo a norma da ABNT NBR 7182.

Os teores de resíduo considerados para misturar com cada solo foram de 30%, 35%, 40% e 45%. O limite foi estabelecido em 40% para ambos os solos, porque além deste valor a execução dos ensaios passava a apresentar grande dificuldade.

Os corpos-de-prova moldados nesta etapa foram aproveitados para realizar ensaios de compressão simples para uma avaliação inicial do comportamento das misturas.

Determinado o teor de resíduo máximo para a composição das misturas, dois teores de cal, 5 e 10%, foram acrescentados às mesmas, e então foi avaliada a melhoria que a introdução da cal promovia à mistura.

Teores de 5% e 10% de cal têm sido utilizados em outros trabalhos para verificar a influência da cal nas características dos solos. Dantas (1970) e Castro & Serafin (1974) verificaram a influência da cal na massa específica seca e umidade ótima; Mendonça *et al.* (1997) verificaram a influência da cal em função do tempo e temperatura de cura, resistência à compressão simples e diametral; Tuncer & Basma (1991) verificaram a influência nas resistências à tração e compressão; Basma & Tuncer (1991) verificaram a influência nas mudanças de volume. Estes e outros trabalhos facilitam a comparação e avaliação dos resultados com teores de 5% e 10% de cal.

Finalmente, na **tabela 3.4** apresentam-se as misturas determinadas para avaliação do seu comportamento mecânico.

Tabela 3.4 – Misturas ensaiadas para cada tipo de solo

Misturas	Solo (%)	Resíduo (%)	Cal (%)
Misturas 1 e 7	100	0	0
Misturas 2 e 8	95	0	5
Misturas 3 e 9	90	0	10
Misturas 4 e 10	60	40	0
Misturas 5 e 11	55	40	5
Misturas 6 e 12	50	40	10

Nota: As misturas de 1 a 6 e de 7 a 12 foram compostas com os solos arenoso e argiloso lateríticos respectivamente

Ensaio de compactação complementares, para determinar a umidade ótima e a massa específica seca máxima das misturas escolhidas foram realizados. Esses ensaios foram realizados na energia normal de compactação, seguindo a norma da ABNT NBR 7182. Os corpos-de-prova foram aproveitados e ensaiados para determinação da resistência à compressão simples.

3.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS

A determinação das propriedades mecânicas das misturas baseou-se nos resultados de ensaios de Índice de Suporte Califórnia (CBR), compressão simples e compressão diametral.

3.5.1 Ensaio para determinação do índice suporte Califórnia

O ensaio foi realizado na umidade ótima, massa específica seca máxima e na energia normal de compactação segundo norma da ABNT NBR 9895. Antes de serem submetidos ao ensaio de penetração, os corpos-de-prova foram curados durante sete dias com os anéis de sobrecarga, três dias na câmara úmida (1) e quatro dias imersos em água (2), conforme observa-se na **figura 3.5**.

Figura 3.5 – Cura dos corpos-de-prova de CBR, (1) corpos-de-prova na câmara úmida, (2) corpo-de-prova imerso em água

A velocidade de penetração foi de 1,25 mm/minuto e a expansão foi medida somente nos dias em que os corpos-de-prova encontravam-se imersos na água, com extensômetros de 0,01mm de aproximação.

3.5.2 Resistência à compressão simples

3.5.2.1 Moldagem dos corpos-de-prova

O ensaio de compressão simples foi efetuado com corpos-de-prova compactados estaticamente, previamente colocados na umidade ótima e massa específica seca máxima.

As **figuras 3.6 e 3.7** apresentam, respectivamente, o molde utilizado na compactação, que é um conjunto de peças metálicas acopláveis constituído de um corpo cilíndrico principal, dois anéis complementares e dois êmbolos espaçadores e a prensa utilizada na moldagem, de marca VERSA TESTER 30M do Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP.

As misturas foram compactadas em três camadas, utilizando-se o molde cilíndrico metálico de diâmetro interno de 5,08cm e altura 10,16cm. A compactação das camadas é executada com ajuda dos êmbolos espaçadores, atingindo cada camada um terço da altura total do corpo-de-prova.

Figura 3.6 – Equipamento para moldagem dos corpos-de-prova de compressão simples (1) cilindro principal, (2) anéis complementares, (3) êmbolos espaçadores

Figura 3.7 – Prensa para moldagem, VERSA TESTER 30M

Para cada mistura foram feitos três corpos-de-prova, para depois adotar uma média estatística dos valores encontrados.

3.5.2.2 Execução do ensaio de resistência à compressão simples

Depois de sete dias na câmara úmida os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples (**Figura 3.8**).

Figura 3.8 – Ruptura dos corpos-de-prova no ensaio de compressão simples

Os ensaios foram realizados com uma velocidade de 1,25mm/min na prensa do laboratório de estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP. Após a ruptura, as dimensões dos corpos-de-prova foram medidas com ajuda de um vernier para verificar a deformação.

3.5.3 Resistência à tração por compressão diametral

3.5.3.1 Moldagem dos corpos-de-prova

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram efetuados com corpos-de-prova compactados estaticamente, previamente colocados na umidade ótima e massa específica seca máxima. Foi utilizada a mesma prensa utilizada para moldar os corpos-de-prova para compressão simples.

O molde utilizado na compactação é um conjunto de peças metálicas constituído de corpo cilíndrico e dois êmbolos espaçadores, apresentados na **figura 3.9**. As misturas foram compactadas numa camada de 5cm de altura por 5cm de diâmetro.

Figura 3.9 – Equipamento utilizado para moldagem dos corpos-de-prova de tração por compressão diametral (1) cilindro principal, (2) êmbolo maior, (3) êmbolo menor

3.5.3.2 Execução do ensaio de tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral ou tração indireta foi desenvolvido por Lobo Carneiro e Barcellos, no Brasil, para determinar a resistência à tração de corpos-de-prova de concreto com cimento Portland. Consiste em ensaiar o corpo-de-prova sem confinamento com uma carga de compressão ao longo de um plano diametral, aplicada através de dois frisos de carga opostos (**figura 3.10**). Esse tipo de carregamento produz uma tensão de tração relativamente uniforme ao longo do plano diametral vertical (Pinto & Preussler, 1980).

A expressão para calcular a tração no centro da amostra é a seguinte:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi td} \quad (3.1)$$

Onde:

F é a carga diametral aplicada;

t e d são a altura e diâmetro da amostra respectivamente.

Figura 3.10 – Ruptura dos corpos-de-prova de compressão diametral

Os ensaios foram realizados na mesma prensa e com a mesma velocidade que os ensaios de compressão simples.

3.6 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA

Terminados os ensaios com tempo de cura de 7 dias, foram analisados os resultados e escolhidas as misturas para realizar os ensaios variando-se os tempos de cura, visando avaliar o comportamento no tempo das misturas. A composição das misturas escolhidas para ambos solos foi a seguinte: 10% de cal, 40% de resíduo e 50% de solo.

Os ensaios realizados com estas misturas foram: compressão simples e compressão diametral para 3, 7 e 28 dias de cura na câmara úmida e Índice de Suporte Califórnia (CBR) para 7, 14 e 28 dias de cura, sendo 3, 10 e 24 dias na câmara úmida e 4 dias imersos em água. A expansão dos corpos-de-prova de CBR só foi medida durante o período de imersão.

Isto permitiu avaliar o efeito pozolânico sobre as misturas devido à cal e ao resíduo. Os procedimentos de moldagem e ensaios foram os mesmos estabelecidos no item 3.5.

3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.7.1 Método para aceitação dos corpos-de-prova

A análise dos resultados dos ensaios de compressão simples, compressão diametral e índice de suporte Califórnia foi feita com base nos valores estatísticos de média e desvio padrão; sendo aplicado o teste de Grubbs para identificação de *outliers* (GRUBBS, 1969).

Para aplicação do teste de Grubbs primeiro deve-se verificar que os dados podem ser razoavelmente representados por uma distribuição normal. O teste de Grubbs está definido pelas seguintes hipóteses: hipótese nula (H_0), não existe nenhum *outlier* nos resultados dos ensaios; hipótese alternativa (H_1), existe pelo menos um *outlier* nos resultados dos ensaios. Este teste detecta um *outlier* cada vez que é realizado, mesmo que um *outlier* já tenha sido eliminado dos dados. O teste repete-se até que não sejam detectados

outliers. Para a aplicação deste teste deve-se verificar, dentre os dados de um mesmo tratamento, quais são os valores máximo e mínimo. A partir destes valores, calcular o valor estatístico G , definido pela equação:

$$G = \frac{\max |Y_i - \bar{Y}|}{s} \quad (3.2)$$

Onde:

Y_i = valores máximo e mínimo dentro do conjunto de resultados de um mesmo tratamento;

$\bar{Y}$ = média dos resultados de um mesmo tratamento;

s = desvio padrão dos resultados de um mesmo tratamento.

O valor estatístico G deve ser comparado com o valor $G_{\text{crítico}}$ que depende do número de repetições (N) e grau de confiança (α) o resultado é considerado um *outlier* quando $G > G_{\text{crítico}}$.

Para esta pesquisa adotou-se nível de confiança de 95% e foram feitas três observações para cada ensaio, sendo portanto o $G_{\text{crítico}}$ utilizado 1,15.

3.7.2 Análise de variância

Foi feita a análise de variância dos resultados dos ensaios de compressão simples, compressão diametral e índice de suporte Califórnia, verificando-se a influência do tipo de solo, teor de resíduo, teor de cal e tempo de cura.

A análise de variância é um procedimento estatístico comum para comparação simultânea de médias populacionais, que permite realizar o teste de hipótese e verificar a hipótese de que o efeito sob consideração é significativo. Deve-se destacar que a aceitação de uma hipótese simplesmente implica que os dados não apresentam suficientes evidências para rejeitá-la.

Um teste de hipótese estatístico é o critério que permite a aceitação ou rejeição da hipótese em consideração. A validade dos testes estatísticos

depende da existência de réplicas, pois estas fornecem uma estimativa do erro aleatório e tornam possível o uso de tabelas de significância, construídas sob a consideração de que os erros são independentes (GARCIA-DIAZ & PHILLIPS, 1995).

O teste de hipótese F baseia-se na comparação do valor F calculado com valores de F tabelados, denominados $F_{\text{teórico}}$. O F calculado é obtido a partir dos resultados laboratoriais e o $F_{\text{teórico}}$ é função dos graus de liberdade dos tratamentos, do erro e do nível de confiança adotado. Se o valor de $F_{\text{calculado}}$ for maior que $F_{\text{teórico}}$, pode-se afirmar, com o nível de confiança adotado, que a hipótese é aceita.

3.8 FORMAÇÃO DE CRISTAIS NA SUPERFÍCIE DOS CORPOS-DE-PROVA

Antes de iniciada a presente pesquisa foi realizado um estudo utilizando misturas constituídas com o resíduo da fabricação de pasta de celulose, cal e um solo com 60% de finos, classificado como CL e A-7-6, respectivamente através da classificação unificada e HRB. Na ocasião observou-se que os corpos-de-prova deixados no ambiente do laboratório, sem nenhum tipo de proteção, apresentavam a formação de cristais em suas superfícies.

A constatação da formação de cristais na superfície dos corpos-de-prova, no estudo preliminar, motivou a continuidade da análise deste aspecto durante o presente estudo. sendo realizados ensaios de microscopia eletrônica por varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX) no resíduo puro e misturas e de solos, resíduo, com e sem adição de cal.

3.8.1 Ensaio de microscopia eletrônica por varredura

Os ensaios de microscopia eletrônica por varredura (MEV) foram realizados com a finalidade de observar a microestrutura do resíduo antes e depois de misturado aos solos. O aparelho usado na microscopia eletrônica foi

o "Digital Scanning Microscope – DSM 960 – Zeiss" que pertence ao Instituto de Física de São Carlos/USP.

Para a realização do ensaio de MEV, as amostras compostas da fração fina dos solos (% passada na peneira N°200) foram fixadas com esmalte incolor sobre pequenos pinos de alumínio. Em seguida, as amostras foram submetidas a um banho metálico (banho de ouro) para garantir a existência de um material condutor, o que melhora a definição de imagem.

Os aumentos estabelecidos para cada amostra foram de 10.000X, 3.000X e 1.000X, para as seguintes amostras:

- Amostra 1 → Resíduo puro seco ao ar;
- Amostra 2 → Resíduo re-hidratado e seco por 24h em estufa a temperatura constante de 50°C;
- Amostra 3 → Material proveniente do corpo-de-prova compactado na ω_o e ρ_{dmax} preparado com 65% de solo e 35% de resíduo e ensaiado à compressão diametral após 3 dias de cura e em seguida, exposto ao ar por 20 dias;
- Amostra 4 → Cristais provenientes do corpo-de-prova compactado na ω_o e ρ_{dmax} preparado com 65% de solo e 35% de resíduo ensaiado à compressão diametral após 3 dias de cura e em seguida, exposto ao ar por 20 dias;
- Amostra 5 → Cristais provenientes do corpo-de-prova compactado na ω_o e ρ_{dmax} preparado com 60% de solo, 35% de resíduo e 5% de 3 cal, ensaiado à compressão diametral após 3 dias de cura e em seguida, deixado na câmara úmida por 20 dias.

3.8.2 Ensaio de difração de raios-X

Os ensaios de difração de raios-X (DRX) foram realizados com a finalidade de detectar os elementos químicos inorgânicos mais importantes do resíduo puro e das misturas após moldagem. Estes ensaios foram realizados no Instituto de Física de São Carlos/USP.

De mesma maneira que para o ensaio MEV, pinos de dimensões padronizadas são preparados e, neste caso, o banho condutor deve ser de carbono. As mesmas condições utilizadas no ensaio de MEV foram repetidas no ensaio de difração de raios-X.

Os ensaios têm como resultado a indicação dos elementos químicos inorgânicos que compõem a área do pino apontada pelos raios-X. O aumento de 20X foi o utilizado para a realização desses ensaios

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A investigação experimental foi conduzida para se avaliar o comportamento mecânico de misturas compactadas constituídas de solo, resíduo da produção de pasta de celulose e cal, combinadas segundo diferentes proporções.

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação das misturas foram realizados na energia normal do ensaio Proctor para determinação dos correspondentes valores de massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) e umidade ótima (ω_o).

Preliminarmente, foram ensaiadas misturas de solo e diversos teores de resíduo para se determinar o maior teor trabalhável deste material, passível de ser adicionado à mistura. O teor máximo obtido foi de 40%. Teores maiores acarretavam dificuldades na execução do ensaio de compactação.

Fixado o teor máximo de resíduo em 40%, foram então realizados ensaios de compactação para misturas contendo este teor de resíduo, teores de cal de 5% e 10% e o restante constituído por um dos dois solos estudados. Ensaio complementares para misturas de solo com 5% e 10% de cal, sem

resíduo, foram também realizados para permitir a avaliação da influência, através de uma comparação, do resíduo no comportamento das misturas.

A **tabela 4.1** apresenta a massa específica seca máxima e a umidade ótima obtidas nos ensaios realizados para se determinar o máximo teor de resíduo a ser considerado na constituição das misturas, respectivamente para os solos arenoso e argiloso. E as **figuras 4.1** e **4.2** mostram as curvas de compactação determinadas nestes mesmos ensaios.

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.1** e as **figuras 4.1** e **4.2**, observa-se, para ambos os solos, que maiores teores de resíduo resultam na diminuição da massa específica seca máxima e no aumento da umidade ótima. Para cada 5% de resíduo acrescentado, a massa específica seca máxima reduz-se de 2% a 4% e a umidade ótima aumenta de 2% a 11%, valores esses tomados relativamente.

Tabela 4.1 – Massa específica seca máxima e umidade ótima das misturas de resíduo e solo, sem adição de cal, obtidas nos ensaios preliminares

Tipo de Solo	Mistura		ρ_{dmax} (g/cm ³)	ω_o (%)
	Solo (%)	Resíduo (%)		
Arenoso	70	30	1,725	17,1
	65	35	1,685	18,2
	60	40	1,635	20,0
	55	45	1,605	21,05
Argiloso	70	30	1,715	17,6
	65	35	1,685	18,95
	60	40	1,620	21,0
	55	45	1,590	21,5

Figura 4.1 – Curvas de compactação das misturas de resíduo e solo arenoso, sem adição de cal, obtidas nos ensaios preliminares

Figura 4.2 – Curvas de compactação das misturas de resíduo e solo argiloso sem adição de cal, obtidas nos ensaios preliminares

A **tabela 4.2** apresenta a massa específica seca máxima e a umidade ótima do solo puro, das misturas constituídas de solo e 40% de resíduo, e das misturas de solo, 40% de resíduo e 5% ou 10% de adição de cal, respectivamente para os solos arenoso e argiloso. E as **figuras 4.3 e 4.4** mostram as curvas de compactação determinadas nestes mesmos ensaios.

Tabela 4.2 – Massa específica seca máxima e umidade ótima dos solos, das misturas de resíduo e solo e das misturas de resíduo solo e cal

Tipo de Solo	Mistura			ρ_{dmax} (g/cm ³)	ω_o (%)
	Solo (%)	Resíduo (%)	Cal (%)		
Arenoso	100	0	0	1,920	11,1
	95	0	5	1,850	12,5
	90	0	10	1,770	15,1
	60	40	0	1,635	20
	55	40	5	1,520	23,2
	50	40	10	1,470	23,8
Argiloso	100	0	0	1,790	15,3
	95	0	5	1,720	16,1
	90	0	10	1,680	17,2
	60	40	0	1,620	21,0
	55	40	5	1,495	25,3
	50	40	10	1,440	26,2

Figura 4.3 – Curvas de compactação das diversas misturas constituídas com o solo arenoso

Figura 4.4 – Curvas de compactação das diversas misturas constituídas com o solo argiloso

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.2** e as **figuras 4.3 e 4.4**, observa-se que a adição de resíduo conduz a uma diminuição da ρ_{dmax} e um aumento da ω_o para todas as misturas, independentemente do tipo de solo e do teor de cal usados. Por outro lado, a adição ou o aumento do teor de cal também age no mesmo sentido, diminuindo o ρ_{dmax} e aumentando a ω_o . Este comportamento é normal para misturas de solo cal segundo dados apresentados na *state of the art 5 – Lime stabilization* (TRB, 1987).

Analisando-se a forma das curvas de compactação apresentadas nas **figuras 4.3 e 4.4**, observa-se, também, que de forma geral a adição de cal conduz a uma suavização destas curvas tanto para misturas sem resíduo como para aquelas com resíduo, sendo este efeito um pouco mais pronunciado no caso destas últimas misturas. Este fato indica que a ρ_{dmax} das

misturas com cal são menos sensíveis à variação da umidade de compactação que as demais misturas.

As figuras 4.5 e 4.6 ilustram a variação da massa específica seca máxima com a variação do teor de cal para misturas sem resíduo e com 40% de resíduo para os solos arenoso e argiloso respectivamente.

Figura 4.5 – Massa específica seca máxima em função do teor de cal para as misturas com solo arenoso

Figura 4.6 – Massa específica seca máxima em função do teor de cal para as misturas com solo argiloso

Analisando-se as **figuras 4.5 e 4.6**, observa-se, conforme já destacado anteriormente, que a ρ_{dmax} diminui com a adição de resíduo e com o aumento do teor de cal, para ambos os solos. As misturas sem resíduo constituídas pelos solos arenoso e argiloso têm uma diminuição na ρ_{dmax} , respectivamente, de 3,6% e 3,9% quando é adicionado 5% de cal, e uma diminuição de 7,8% e 6,1% quando é adicionado 10% de cal. Isto mostra que o tipo de solo afeta pouco, neste aspecto, o comportamento das misturas.

Quanto às misturas com 40% de resíduo, as constituídas com os solos arenoso e argiloso têm uma diminuição na ρ_{dmax} , respectivamente, de 7,0% e 7,7% quando é adicionado 5% de cal. Para 10% de cal, a diminuição é de 10,1% e 11,1% respectivamente. Conclui-se portanto, que também para as misturas com resíduo, a variação do ρ_{dmax} com o teor de cal é pouco afetado pelo tipo de solo.

Comparando-se as massas específicas secas máximas de misturas sem resíduo e com 40% de resíduo, observa-se que a adição de resíduo produz, para as misturas sem cal, uma diminuição de ρ_{dmax} de 14,8% e 9,5%, respectivamente para os solos arenoso e argiloso. Para 5% de cal, esta diminuição é de, respectivamente, 17,8% e 13,1%. E para 10% de cal, esta diminuição é de, respectivamente, 16,9% e 14,3%. Isto mostra que para as misturas constituídas com o solo arenoso, o efeito da adição de resíduo na diminuição do ρ_{dmax} é maior que para as misturas com solo argiloso, numa proporção, na média, igual a 4:3. Tal comportamento explica-se em razão do solo arenoso apresentar menor quantidade de finos em sua constituição (36%) quando comparado com o solo argiloso (51%). Assim, a adição de resíduo, material constituído principalmente de finos (96%), teria um efeito relativo na alteração da composição granulométrica das misturas com o solo arenoso, maior que a alteração produzida nas misturas com o solo argiloso.

As **figuras 4.7 e 4.8** ilustram a variação da umidade ótima com a variação do teor de cal para misturas sem resíduo e com 40% de resíduo para os solos arenoso e argiloso respectivamente.

Figura 4.7 – Umidade ótima em função do teor de cal para as misturas com solo arenoso

Figura 4.8 – Umidade ótima em função do teor de cal para as misturas com solo argiloso

Analisando-se as **figuras 4.7 e 4.8**, observa-se, conforme já destacado anteriormente, que a ω_o aumenta com a adição de resíduo e com o aumento do teor de cal, para ambos os solos. As misturas sem resíduo constituídas pelos solos arenoso laterítico e argiloso laterítico têm um aumento relativo na umidade ótima, respectivamente, de 12,6% e 5,2% quando é adicionado 5%

de cal. Para 10% de cal, o aumento é de 36% e 12,4%, respectivamente. Isto mostra que a umidade ótima do solo arenoso vê-se mais afetada que a umidade ótima do solo argiloso pela adição de cal.

Com relação às misturas com 40% de resíduo, as constituídas com os solos arenoso e argiloso têm um aumento relativo na ω_o , respectivamente, de 16% e 19,9% quando é adicionado 5% de cal, Para 10% de cal, o aumento é de 19% e 24,2%, respectivamente. Conclui-se portanto, que para estas misturas, a variação da ω_o com o teor de cal é menos afetada pelo tipo de solo que as misturas sem resíduo.

Comparando-se as umidades ótimas de misturas sem resíduo e com 40% de resíduo, observa-se que a adição de resíduo produz, para as misturas sem cal, um aumento relativo da ω_o de 80% e 38%, respectivamente, para os solos arenoso e argiloso. Para as misturas com 5% de cal, este aumento é de, respectivamente, 86% e 57%. E para 10% de cal, este aumento é de 58% e 52%. Isto mostra que para as misturas constituídas com solo arenoso, o efeito da adição do resíduo no aumento porcentual da ω_o é maior que para as misturas com solo argiloso. A explicação para tal fato é a mesma já levantada anteriormente para justificar a diferença na variação da ρ_{dmax} de misturas de solo e resíduo constituídas pelos 2 tipos de solos.

4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS

Os resultados aqui descritos referem-se aos ensaios de compressão simples, compressão diametral e CBR realizados, visando avaliar as propriedades mecânicas das misturas estudadas. Foram utilizadas misturas constituídas com os dois tipos de solos, um arenoso e um argiloso, sem resíduo e com 40% de resíduo, e sem cal e com dois teores de cal, 5 e 10%.

Preliminarmente, aproveitando-se os corpos-de-prova moldados nos ensaios de compactação, foram executados ensaios para se determinar a resistência à compressão simples imediata, ou seja, sem cura.

Depois de determinada a resistência à compressão simples imediata, foram moldados corpos-de-prova na umidade ótima e massa específica seca máxima para os ensaios de resistência à compressão simples, compressão diametral e índice de suporte Califórnia.

Para todas as misturas, foi observado o tempo de cura de 7 dias na câmara úmida para os corpos-de-prova ensaiados à compressão simples e compressão diametral, e 3 dias na câmara úmida e 4 dias em imersão em água para os corpos-de-prova utilizado no ensaio CBR. Complementarmente, foram também ensaiados corpos-de-prova constituídos pelos dois tipos de solos, 40% de resíduo e 10% de cal e curados por 3 e 28 dias para se avaliar o efeito do tempo de cura nas propriedades mecânicas das misturas.

4.3.1 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples é um dos critérios mais utilizados em pavimentação para se avaliar a adequabilidade de misturas estabilizadas para a construção de bases e sub-bases rodoviárias. A diferença de resistência à compressão simples entre a mistura sem cal e a mistura com cal tem sido utilizada como um indicador para determinar se o solo é ou não reativo à cal: ganhos substanciais de resistência indicam que o solo é reativo e provavelmente produzirá um material de pavimentação de qualidade.

Segundo o procedimento Illinois apresentado na *State of the art 5 – Lime Stabilization* (TRB, 1987), o solo estabilizado com cal deve apresentar um aumento na resistência à compressão simples de 350 kPa em relação ao solo natural para o mesmo ser considerado reativo à cal. Além de serem reativas, as misturas devem enquadrar-se acima de limites no tocante às resistências mínimas para construção de camadas de base e sub-base, estabelecidos, respectivamente, como 1000kPa e 700kPa, valores determinados após 28 dias de cura a 20°C.

4.3.1.1 Resistência à compressão simples imediata

A **tabela 4.3** apresenta as resistências à compressão simples imediatas obtidas ensaiando-se os corpos-de-prova moldados para se analisar a quantidade máxima de resíduo que ainda permitiria a trabalhabilidade da mistura nos ensaios de compactação e também ensaiando-se os corpos-de-prova moldados nos ensaios de compactação realizados após a definição do teor máximo de resíduo. Os valores de resistência à compressão simples foram obtidos mediante a interpolação para a ω_o dos resultados determinados ao longo da curva de compactação.

Tabela 4.3 – Resistência à compressão simples imediata dos solos, misturas de solo e cal e misturas de solo, resíduo e cal

	Mistura Solo-Resíduo-Cal (%)	Solo arenoso RCS (kPa)	Solo argiloso RCS (kPa)
Ensaio de compactação para análise da trabalhabilidade	70-30-0	127	129
	65-35-0	122	112
	60-40-0	120	105
	55-45-0	112	98
Ensaio de compactação para determinação da ω_o e ρ_{max}	100-0-0	120	160
	95-0-5	287	370
	90-0-10	250	305
	55-40-5	260	210
	50-40-10	300	250

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.3** e conforme ilustrado nas **figuras 4.9 e 4.10**, observa-se, para as misturas utilizadas para se determinar a quantidade máxima de resíduo que ainda permitiria a trabalhabilidade, que o aumento do teor de resíduo resulta na diminuição da resistência à compressão simples. Observa-se, também que essas misturas apresentam resistências à compressão simples baixas para serem utilizadas em camadas de base ou sub base de pavimentos, mesmo considerando que os corpos-de-prova não tenham sido submetidos à cura. Destaca-se que a diminuição de resistência no intervalo de 35% a 40% de resíduo não é muito expressiva, corroborando a escolha do teor de resíduo de 40%, feita

anteriormente, que pode ser considerada adequada, pois alia um teor de resíduo elevado a uma resistência ainda considerável.

Figura 4.9 – Variação da resistência à compressão simples imediata com o acréscimo do teor de resíduo para os solos arenoso e argiloso

Analisando-se o segundo grupo de resultados da **tabela 4.3** e conforme ilustrado na **figura 4.10**, observa-se que a adição de cal tem o efeito esperado, ou seja, contribui para a elevação da resistência das misturas. Supõe-se que este ganho seja devido à floculação e aglomeração de partículas promovidas pela cal. Neste sentido, os solos puros e as misturas com resíduo alcançaram acréscimos de resistência superiores a 100% quando se adiciona 5% de cal. Para 10% de cal, os solos sem resíduo mostraram uma queda de resistência de aproximadamente 15% com relação ao teor de 5%, considerando-se a média dos valores correspondentes aos dois solos. Este fato revela que a adição de cal é favorável até um determinado limite, a partir do qual, novos acréscimos conduziram a quedas de resistência. Comportamento semelhante já foi relatado para solos estabilizados com cal por diversos autores (GUIMARÃES, 1971; CASTRO *et al*, 1974; MENDONÇA *et al*, 1997, etc.).

Figura 4.10 – Resistência à compressão simples imediata das misturas de solos arenoso e argiloso

Quando se analisa o efeito da adição de 10% de cal para as misturas constituídas com 40% de resíduo, observa-se que o aumento do teor de cal de 5% para 10% conduz a um aumento de resistência de 16%, considerando-se a média dos dois solos, ao contrário do observado para as misturas sem resíduo. A explicação para esta diferença reside no fato de que a cal reage principalmente com a fração fina dos materiais e, no caso dos solos, a disponibilidade de finos para a reação com 10% de cal já estaria esgotada, o que não aconteceria com a mistura com resíduo, que conta com uma parcela significativamente maior de finos.

É importante destacar que os resultados de resistência imediata aqui apresentados têm caráter ilustrativo e foram utilizados como medida de comparação entre o comportamento das diversas misturas. A sua utilização em conjunto com os demais ensaios deve ser feita com reserva, visto que o controle dos mesmos não foi rigoroso, não houve repetições de ensaios e o processo de compactação não é o mesmo processo observado na moldagem dos demais corpos-de-prova.

4.3.1.2 Resistência à compressão simples aos 7 dias de cura

Os ensaios de resistência à compressão simples para as misturas de solo, resíduo e cal com 7 dias de cura foram realizados observando-se os procedimentos estabelecidos no item 3.5.2 do capítulo 3. O resumo dos resultados obtidos nestes ensaios está apresentado no anexo A.

A **tabela 4.4** apresenta os valores de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura para todas as misturas estudadas e também a diferença e o correspondente ganho relativo de resistência com a adição de 5% e 10% de cal, calculado com relação à resistência obtida sem a adição de cal. E as **figuras 4.11 e 4.12** ilustram a variação da resistência à compressão simples para as diversas misturas constituídas pelos solos arenoso e argiloso, respectivamente. Os valores apresentados foram calculados utilizando o método de GRUBBS para a eliminação de *outliers*, conforme apresentado no anexo B.

Tabela 4.4 – Resistência à compressão simples dos solos, misturas de solo e cal e misturas de solo, resíduo e cal

Tipo de Solo	Teor de resíduo (%)	Teor de cal (%)	Resistência à compressão simples (kPa)	Diferença (kPa)	Ganho (%)
Arenoso	0	0	250		
		5	426	176	70
		10	296	46	18
	40	0	141		
		5	393	252	179
		10	695	554	393
Argiloso	0	0	285		
		5	761	476	167
		10	706	421	148
	40	0	173		
		5	413	240	139
		10	836	663	383

Nota: Tempo de cura 7 dias

Figura 4.11 – Resistência à compressão simples em função do teor de cal para as misturas com solo arenoso

Figura 4.12 – Resistência à compressão simples em função do teor de cal para as misturas com solo argiloso

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.4** e as **figuras 4.11** e **4.12**, observa-se que ambos os solos sem adição de resíduo têm a resistência à compressão simples aumentada quando é adicionada cal, sendo que os maiores valores de resistência acontecem para o teor de 5% de cal e não para o teor de 10%. Os solos arenoso e argiloso apresentam, para 5% de

cal, respectivamente, ganhos de resistência de 70% e 167% em relação à resistência do solo não estabilizado. A diminuição da resistência observada quando se aumenta o teor de cal de 5% para 10% é compatível com o comportamento já constatado em outros estudos. Por exemplo, a pesquisa realizada por Mendonça *et al.* (1997), com solos finos, mostrou que picos de resistência são alcançados com o teor de 6% de cal e que acontece uma redução de resistência para 10% de cal. Essa diminuição de resistência com o aumento do teor de cal, a partir de um determinado limite, conforme já explicado anteriormente, deve-se ao fato da fração fina dos solos para reagir com 10% de cal ter-se esgotado.

Quando é realizada essa mesma análise para as misturas com 40% de resíduo, observa-se que estas apresentam ganhos crescentes de resistência à compressão simples quando se aumenta o teor de cal. Quando é acrescentado 5% de cal, as misturas de solos arenoso e argiloso com resíduo apresentam resistências, respectivamente, 179% e 138% maiores que as misturas sem cal. Para 10% de cal, o aumento da resistência é de, respectivamente, 393% e 383%. Comparando-se os ganhos de resistência dos dois solos com adição de cal, observa-se que o tipo de solo não conduz a diferenças expressivas no padrão de variação deste parâmetro, apesar das resistências absolutas alcançadas pelas misturas constituídas com o solo argiloso serem, na média, 16% maiores que aquelas correspondentes ao solo arenoso. Observa-se, ainda, que o ganho de resistência no intervalo de 5% a 10% de cal é um pouco maior que o verificado no intervalo anterior.

Comparando-se as resistências à compressão simples de misturas sem resíduo e com 40% de resíduo, observa-se que a adição de resíduo produz, para as misturas sem cal, uma diminuição na resistência de 44% e 39%; respectivamente para os solos arenoso e argiloso. Para 5% de cal, a diminuição da resistência é de, respectivamente 8% e 46%. No entanto, para as misturas com 10% de cal, a adição de resíduo produz um aumento de resistência de respectivamente, 135% e 18%. Isto mostra que os maiores valores de resistência são aqueles verificados para as misturas com 40% de resíduo e 10% de cal. Analisando-se o efeito positivo da adição de resíduo no

comportamento das misturas, conclui-se que este só é verificado para o teor de cal de 10%, não se justificando para teores menores, a não ser que na análise também sejam considerados fatores ambientais. Destaca-se, ainda, que o ganho de resistência obtida pela adição de resíduo só é expressivo para as misturas constituídas com o solo arenoso. Para este solo, a máxima resistência alcançada pela mistura sem resíduo, 426kPa, é da ordem de 61% da máxima resistência alcançada pela mistura com resíduo, 695kPa.

4.2.1.3 Influência do tempo de cura na compressão simples

Com base nos resultados dos ensaios com tempo de cura de 7 dias, foram escolhidas as misturas para se realizar os ensaios com os tempos de cura de 3 e 28 dias. A escolha baseou-se no critério do melhor comportamento, tendo sido então escolhidas as misturas constituídas pelos dois tipos de solos, 40% de resíduo e 10% de cal.

A **tabela 4.5** apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples para 0, 3, 7 e 28 dias de cura em câmara úmida. Os valores correspondentes às resistências sem cura foram aqueles obtidos ensaiando-se os corpos-de-prova moldados nos ensaios de compactação e interpolando-se os resultados para a ω_0 , conforme já destacado no **item 4.3.1.1**. Os demais resultados foram obtidos a partir do ensaio de corpos-de-prova preparados com este fim e os valores apresentados foram calculados aplicando-se o método de GRUBBS para a eliminação de *outliners*, conforme apresentado no Anexo B. A **figura 4.13** ilustra a variação da resistência à compressão simples ao longo do tempo de cura das misturas.

Tabela 4.5 – Resistência à compressão simples aos 0, 3, 7 e 28 dias de cura

Tempo de cura (dias)	Resistência à compressão simples	
	Solo arenoso (kPa)	Solo argiloso (kPa)
0	120	160
3	532	687
7	694	836
28	1446	1044

Figura 4.13 – Variação da resistência à compressão simples com o tempo de cura para as misturas de solo, resíduo e cal

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.5** e a **figura 4.13**, observa-se que existe um aumento continuado da resistência à compressão simples com o aumento do tempo de cura para os dois tipos de solo. Este comportamento deve-se à reação pozolânica da cal com o solo e com o resíduo, a qual se desenvolve ao longo do tempo. As resistências alcançadas pelas misturas com os solos arenoso e argiloso aos 28 dias de cura são, respectivamente 1044kPa e 1446kPa. Valores da mesma ordem foram encontrados para solos estabilizados com o mesmo teor de cal por diversos autores (EADES e GRIM, 1960; MENDONÇA *et al*, 1997, etc.). Destaca-se que ambas as misturas enquadram-se acima do limite no tocante às resistências mínimas de construção de camada base de 1000 kPa estabelecido no processo Illinois (TRB, 1987).

Analisando-se a evolução da resistência à compressão simples ao longo do tempo de cura, observa-se que a taxa de aumento da resistência para os primeiros 3 dias é de 137 e 176 kPa/dia, respectivamente para os solos arenoso e argiloso. Para o intervalo de 3 a 7 dias, a taxa de crescimento é de, respectivamente, 40 e 37 kPa/dia. E para o intervalo de 7 para 28 dias, a taxa de crescimento é de 36 e 10 kPa/dia. Observa-se que as misturas com

solo arenoso têm maiores ganhos de resistência com o tempo de cura que as misturas com solo argiloso, excetuando-se o período de 0 a 3 dias. Enquanto as misturas com solo arenoso aumentam sua resistência quase linearmente após os três dias de cura, as misturas com solo argiloso apresentam uma diminuição do ganho de resistência após os 3 dias de cura. Conforme observado por Graves (1987), a ação cimentante da cal sobre materiais calcários é muito efetiva, assim, tendo em vista que o resíduo utilizado nesta pesquisa é essencialmente calcário, o melhor comportamento das misturas com solo arenoso deve-se a que a fração fina do solo argiloso consumiria uma parcela elevada da cal disponibilizada, restando pouco para reagir com o resíduo presente na mistura.

Finalmente, comparando-se as resistências absolutas das misturas constituídas com os solos arenoso e argiloso, observa-se que a resistência sem cura da primeira mistura é 33% menor que da segunda. Para 3 dias e 7 dias de cura, as resistências correspondentes à primeira mistura ainda conservam-se menores que as correspondentes à segunda mistura, com uma diferença, respectivamente, de 29% e 20%. A **figura 4.13** mostra que as duas misturas alcançam uma mesma resistência aos 12 dias de cura. A partir deste ponto a resistência da mistura com solo arenoso ultrapassa a da mistura com solo argiloso, sendo que, aos 28 dias, a diferença é de 38%, a favor da primeira mistura. Isto mostra que as misturas com solo arenoso têm melhor comportamento ao longo do tempo que as misturas com solo argiloso, corroborando com a análise feita no parágrafo anterior.

4.3.2 Resistência à tração indireta

As solicitações à tração nas camadas de misturas com cal influem no desempenho do pavimento. As elevadas resistência e rigidez que estas camadas podem apresentar induzem um comportamento de placa, que além de reduzir substancialmente as pressões transmitidas às camadas subadjacentes, geram tensões de flexão consideráveis na própria camada estabilizada. Segundo Thompson (1969), esta condição pode controlar o

projeto estrutural das camadas de solos estabilizados com cal. Este aspecto justifica a determinação do comportamento à tração das misturas analisadas no presente estudo.

O ensaio de compressão diametral tem sido considerado como uma das melhores alternativas para se determinar a resistência à tração dos corpos-de-prova de misturas estabilizadas (KENNEY & HUDSON, 1968). Os ensaios de resistência à compressão diametral para as misturas de solo resíduo e cal foram realizados observando-se os procedimentos estabelecidos no item 3.5.3 do capítulo 3. O resumo dos resultados obtidos nestes ensaios estão apresentados no anexo A.

4.3.2.1 Resistência à tração indireta aos 7 dias de cura

A tabela 4.6 apresenta os valores de resistência à tração obtidos no ensaio de compressão diametral aos 7 dias de cura para todas as misturas estudadas e também a diferença e o correspondente ganho relativo com adição de 5% e 10% de cal, calculado com relação à resistência obtida sem a adição de cal. Os valores apresentados foram calculados utilizando o método de GRUBBS para a eliminação de *outliers*, conforme apresentado no anexo B.

Tabela 4.6 – Resistência à tração indireta dos solos, misturas de solo e cal e misturas de solo, resíduo e cal

Tipo de Solo	Teor de resíduo (%)	Teor de cal (%)	Resistência à tração indireta (kPa)	Diferença (kPa)	Ganho (%)
Arenoso	0	0	68		
		5	102	34	51
		10	68	0	0
	40	0	34		
		5	137	103	302
		10	342	308	905
Argiloso	0	0	86		
		5	222	136	159
		10	222	136	158
	40	0	51		
		5	154	103	202
		10	444	393	771

Nota: Tempo de cura 7 dias

As figuras 4.14 e 4.15 ilustram a variação da resistência à tração indireta para as diversas misturas constituídas pelos solos arenoso e argiloso, respectivamente.

Figura 4.14 – Resistência à tração indireta em função do teor de cal para as misturas com solo arenoso

Figura 4.15 – Resistência à tração indireta em função do teor de cal para as misturas com solo argiloso

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.6** e as **figuras 4.14** e **4.15**, observa-se que ambos os solos sem adição de resíduo têm a resistência à tração indireta aumentada quando é adicionada cal, sendo que a única exceção corresponde à mistura constituída pelo solo arenoso e 10% de cal. Os solos arenoso e argiloso apresentam para 5% de cal, respectivamente, ganhos de resistência de 51% e 159% em relação à resistência do solo não estabilizado. A diminuição da resistência à tração observada quando se aumenta o teor de cal de 5% para 10% é compatível com o comportamento observado nos ensaios de resistência à compressão simples. Essa diminuição de resistência com o aumento do teor de cal a partir de um determinado limite, conforme já explicado anteriormente, deve-se ao fato da fração fina dos solos para reagir com 10% de cal ter-se esgotado.

Quando é realizada esta mesma análise para as misturas com 40% de resíduo, observa-se que estas apresentam ganhos crescentes de resistência à tração indireta quando se aumenta o teor de cal. Para 5% de cal, as misturas de solos arenoso e argiloso com resíduo apresentam resistências, respectivamente, 302% e 202% maiores que as misturas sem cal. Para 10% de cal, o aumento da resistência é de, respectivamente, 905% e 771%. Comparando-se os ganhos de resistência dos dois solos com a adição de cal, observa-se que as misturas com solo arenoso apresentam ganhos de resistência maiores que as misturas com solo argiloso, apesar das resistências absolutas alcançadas pelas misturas constituídas com o solo argiloso serem, na media, 31% maiores que aquelas correspondentes ao solo arenoso. Observa-se, ainda, que o ganho de resistência no intervalo de 5% a 10% de cal é maior que o verificado no intervalo anterior.

Comparando-se as resistências à tração indireta de misturas sem resíduo e com 40% de resíduo, observa-se que a adição de resíduo produz, para as misturas sem cal, uma diminuição na resistência de 50% e 41%, respectivamente para os solos arenoso e argiloso. Para 5% de cal, a mistura com solo argiloso apresenta uma diminuição de resistência de 31%, no entanto, a mistura com solo arenoso apresenta um aumento de resistência de 34%. E para as misturas com 10% de cal, a adição de resíduo produz um

aumento de resistência de, respectivamente, 403% e 101%. Assim, para todas as misturas estudadas, os maiores valores de resistência à tração são aqueles verificados para as misturas com 40% de resíduo e 10% de cal.

Analisando-se o efeito positivo da adição de resíduo no comportamento das misturas, conclui-se que este é verificado para os teores de cal de 10% para as misturas com solo argiloso e para os teores de 5% e 10% para as misturas com solo arenoso, sendo que para este último solo, o efeito positivo para o maior teor de cal é substancialmente maior. Destaca-se, ainda, que as maiores resistências à tração indireta alcançadas pelos solos arenoso e argiloso sem adição de resíduo, respectivamente 102 kPa e 221 kPa, são da ordem de 30% e 50% das máximas resistências alcançadas pelas misturas com resíduo, 342 kPa e 444 kPa, considerando-se ainda os mesmos solos.

4.3.2.2 Influência do tempo de cura na tração indireta

Com base nos resultados dos ensaios com tempo de cura de 7 dias, foram escolhidas as misturas para se realizarem os ensaios com os tempos de cura de 3 e 28 dias. A escolha baseou-se no critério do melhor comportamento, tendo sido então escolhidas as misturas constituídas pelos dois tipos de solos, 40% de resíduo e 10% de cal, as mesmas já contempladas anteriormente no estudo da influência do tempo de cura na resistência à compressão simples.

A **tabela 4.7** apresenta os resultados dos ensaios de compressão diametral para 3, 7 e 28 dias de cura em câmara úmida. Os valores apresentados foram calculados aplicando-se o método de GRUBBS para a eliminação de *outliners*, conforme apresentado no Anexo B. A **figura 4.16** ilustra a variação da resistência à tração indireta ao longo do tempo de cura das misturas.

Tabela 4.7 – Resistência à tração indireta aos 3, 7 e 28 dias de cura

Tempo de cura (dias)	Resistência à tração indireta	
	Solo arenoso (kPa)	Solo argiloso (kPa)
3	234	335
7	348	444
28	802	491

Figura 4.16 – Variação da resistência à tração indireta com o tempo de cura para as misturas de solo, resíduo e cal

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.7** e a **figura 4.16**, observa-se que existe um aumento continuado da resistência à tração indireta com o aumento do tempo de cura para os dois tipos de solo. Este comportamento deve-se à reação pozolânica da cal com o solo e com o resíduo a qual se desenvolve ao longo do tempo. As máximas resistências alcançadas pelas misturas com os solos arenoso e argiloso são, respectivamente 802kPa e 491kPa. Estes valores de resistência à tração indireta estão na faixa de valores típicos de solos estabilizados com cal apresentados na *State of the art 5 – Lime Stabilization* (TRB,1987).

Analisando-se a evolução da resistência à tração indireta ao longo do tempo de cura, observa-se que a taxa de aumento da resistência para o intervalo de 3 a 7 dias é de 29 e 27 kPa/dia, respectivamente para os solos arenoso e argiloso. E para o intervalo de 7 a 28 dias, a taxa de crescimento é de, respectivamente, 22 e 7 kPa/dia. Conclui-se que as misturas com solo arenoso têm maiores ganhos de resistência com o tempo de cura que as misturas com solo argiloso: enquanto as misturas com solo arenoso aumentam sua resistência quase linearmente até os 28 dias de cura, as misturas com solo argiloso apresentam uma diminuição do ganho de resistência após os 7

dias iniciais. Isto se deve, como destacado para os ensaios de compressão simples, a que a ação cimentante da cal sobre materiais calcários é muito efetiva, assim, tendo em vista que o resíduo utilizado é essencialmente calcário, o melhor comportamento das misturas com solo arenoso deve-se a que a fração fina do solo argiloso consumiria uma parcela elevada da cal disponibilizada, restando pouco para reagir com o resíduo presente na mistura.

Finalmente, comparando-se as resistências absolutas das misturas com solo arenoso e argiloso, observa-se que a resistência para 3 dias de cura da primeira mistura é 43% menor que da segunda. Para 7 dias de cura, a resistência correspondente à primeira mistura ainda conserva-se menor que a correspondente à segunda mistura, com uma diferença de 28%. A **figura 4.16** mostra que, da mesma maneira que aconteceu com a resistência à compressão simples, as duas misturas alcançam uma mesma resistência à tração aos 12 dias de cura. A partir deste ponto a resistência da mistura com solo arenoso ultrapassa a da mistura com solo argiloso, sendo que aos 28 dias, a diferença é de 63%, a favor da primeira mistura. Isto mostra que as misturas com solo arenoso têm melhor comportamento ao longo do tempo que as misturas com solo argiloso corroborando com a análise feita no parágrafo anterior.

4.3.3 Comparação das resistências à compressão simples e tração indireta

Analisando-se as os gráficos de barra apresentados nas **figuras 4.17 e 4.18**, respectivamente para misturas com e sem adição de resíduo, observa-se que o padrão de variação das resistências à compressão simples e diametral com o teor de cal é muito diverso quando se comparam estas misturas.

As misturas sem adição de resíduo têm ganhos de resistência à compressão simples e diametral da mesma ordem, respectivamente 101% e 92%, considerando-se valores médios obtidos para os dois solos e os dois teores de cal. No entanto, para as misturas com resíduo, os valores correspondentes são 273% e 545% respectivamente, indicando que a

resistência à compressão diametral é muito mais sensível ao efeito positivo da adição da cal que a resistência à compressão simples no caso destas misturas. Este fato comprova que a reação do resíduo com a cal contribui muito efetivamente para o ganho de resistência à tração, indicando que a mesma promove um efeito cimentante considerável.

Figura 4.17 – Variação relativa das resistências à compressão simples (RCS) e à compressão diametral (RCD) em função do teor de cal para misturas sem adição de resíduo

Figura 4.18 – Variação relativa das resistências à compressão simples (RCS) e à compressão diametral (RCD) em função do teor de cal para misturas com adição de resíduo

Outra maneira de se analisar os efeitos da adição da cal e do resíduo nos solos estudados é considerando-se a variação dos parâmetros de resistência da envoltória de Mohr Coulomb, coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) com a presença destes materiais.

Para efeito de comparação, foram estabelecidas, a partir da média dos resultados obtidos para os dois solos, as envoltórias de Mohr Coulomb correspondentes aos seguintes materiais: solos sem adição de cal ou resíduo, solos com adição de 5% e 10% de cal e solos com 40% de resíduo e 10% de cal. A **tabela 4.8** apresenta os correspondentes valores de c e ϕ e as respectivas variações relativas destes parâmetros calculadas com relação aos valores obtidos para os solos sem adição de cal ou resíduo. A **figura 4.19** ilustra as envoltórias obtidas para cada um dos materiais.

Tabela 4.8 – Valores de coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) dos solos puros, solos com cal, e solos com resíduo e cal

Solo (%)	Resíduo (%)	Cal (%)	Coesão (kPa)	Variação (%)	Ângulo de atrito interno (grau)	Variação (%)
100	0	0	71	-	34°	-
95	0	5	155	118	35°	3
90	0	10	134	89	34°	0
50	40	10	273	285	19°	-79

Figura 4.19 – Envoltórias de Mohr Coulomb para solos puros, solos com adição de cal e solos com resíduo e cal

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.8** e a **figura 4.19**, observa-se para que a adição de 5% e 10% de cal não produz variação do ângulo de atrito interno nas misturas sem adição de resíduo, conservando-se os valores originais correspondentes aos solos puros. Entretanto, a coesão tem um ganho de 118% e 89%, respectivamente, destacando-se o efeito cimentante da cal.

Comparando-se o comportamento dos solos puros com o da mistura constituída com 40% de resíduo e 10% de cal, observa-se que o ângulo de atrito interno diminui 79% e a coesão aumenta 285%. Isto mostra que a adição de resíduo, material com um elevado teor de finos, contribui para a diminuição do ângulo de atrito interno, mas ao mesmo tempo, a reação deste material com a cal, conforme destacado anteriormente, promove uma forte cimentação da mistura, levando a um ganho da coesão bastante expressivo. Destaca-se que o efeito da adição do resíduo seria ainda mais notável se as misturas com o solo arenoso fossem consideradas separadamente.

A seguir, a partir dos resultados da totalidade dos ensaios executados, foram realizadas regressões lineares, que relacionando as resistências à compressão diametral e compressão simples para as misturas sem adição de resíduo e com 40% de adição de resíduo, permitiram a obtenção das **equações 4.1 e 4.2**, respectivamente. As **figuras 4.20 e 4.21** ilustram estas equações.

$$\text{RCD} = 0,3223\text{RCS} - 18,656 \quad (4.1)$$

$$\text{RCD} = 0,5815\text{RCS} - 67,907 \quad (4.2)$$

Onde:

RCD e RCS são respectivamente, as resistências à compressão diametral e compressão simples em kPa.

Figura 4.20 – Relação das resistências à compressão diametral e compressão simples das misturas sem adição de resíduo

Figura 4.21 – Relação das resistências à compressão diametral e compressão simples das misturas com adição de resíduo

Analisando-se as **figuras 4.20 e 4.21**, observa-se que existe uma relação linear muito bem definida, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,97 e 0,99, respectivamente, entre as resistências à compressão simples e compressão diametral das misturas estudadas.

4.3.4 Índice de suporte Califórnia (CBR)

O ensaio de CBR tem sido muito utilizado na avaliação do comportamento de misturas estabilizadas, embora este ensaio, segundo a *State of the art 5 – Lime stabilization* (TRB, 1987), não seja o ensaio mais apropriado para a avaliação de solos estabilizados, pois freqüentemente são alcançados resultados superiores a 100%, que têm pouca utilidade prática e não são significativos como medidas de resistência ou estabilidade. Normalmente, os materiais que apresentam CBR superior a 100% apresentaram também altas resistências à compressão e tração, sendo estes melhores ensaios para avaliar a resistência. Neste estudo o ensaio de CBR foi realizado com um enfoque especulativo.

O ensaio de CBR foi executado na energia normal de compactação, na umidade ótima e massa específica seca máxima, nestas condições o CBR mínimo para camadas estabilizadas granulometricamente adotado pelo DER-SP é de 30% para camada de sub-base e 60% para camada de base. O resumo dos resultados obtidos nestes ensaios estão apresentados no anexo A.

4.3.4.1 Índice de Suporte Califórnia aos 7 dias de cura

Os ensaios de CBR para as misturas de solo, resíduo e cal foram curados 3 dias na câmara úmida e 4 dias imersos em água. A **tabela 4.9** apresenta os valores de CBR e expansão para todas as misturas estudadas e também a diferença e o correspondente ganho relativo do CBR com a adição de 5% e 10% de cal, calculado com relação ao CBR obtido sem a adição de cal. A expansão foi medida só nos dias em que os corpos-de-prova encontravam-se imersos em água. E as **figuras 4.22 e 4.23** ilustram a

variação do CBR para as diversas misturas constituídas pelos solos arenoso e argiloso, respectivamente.

Tabela 4.9 – Valores de CBR e expansão para solos, misturas de solo e cal e misturas de solo, resíduo e cal

Tipo de Solo	Teor de resíduo (%)	Teor de cal (%)	CBR (%)	Diferença (kPa)	Ganho (%)	Expansão (%)
Arenoso	0	0	25			0,02
		5	86	61	244	0,00
		10	63	38	152	0,00
	40	0	9			0,75
		5	37	28	311	0,00
		10	61	52	578	0,00
Argiloso	0	0	20			0,15
		5	90	70	350	0,00
		10	85	65	325	0,00
	40	0	4,4			0,87
		5	48	44	991	0,10
		10	88	84	1900	0,02

Nota: Tempo de cura 7 dias

Figura 4.22 – Índice de suporte Califórnia em função do teor de cal para misturas de solo arenoso

Figura 4.23 – Índice de suporte Califórnia em função do teor de cal para misturas de solo argiloso

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.9** e as **figuras 4.22** e **4.23**, observa-se que ambos os solos sem adição de resíduo têm o índice de suporte Califórnia aumentado quando é adicionada cal, sendo que os maiores valores de CBR acontecem para o teor de 5% de cal e não para o teor de 10%. Os solos arenoso e argiloso apresentam para 5% de cal, respectivamente, ganhos de resistência de 244% e 350% em relação ao CBR do solo não estabilizado. A diminuição do CBR observada quando se aumenta o teor de cal de 5% para 10% é compatível com o comportamento já constatado em outros estudos. Por exemplo, a pesquisa realizada por Castro *et al* (1974) com vários solos mostrou que picos de CBR são alcançados com o teor de 5% de cal e que acontece uma redução do CBR para 10% de cal. Esta diminuição do CBR com o aumento do teor de cal a partir de um determinado limite, conforme já explicado anteriormente, deve-se ao fato da fração fina dos solos para reagir com 10% de cal ter-se esgotado.

Quando é realizada esta mesma análise para as misturas com 40% de resíduo, observa-se que estas apresentam ganhos crescentes de CBR quando se aumenta o teor de cal. Para 5% de cal, as misturas de solos arenoso e argiloso com resíduo apresentam CBRs, respectivamente, 311% e 991% maiores que as misturas sem cal. Para 10% de cal, o aumento do CBR é de, respectivamente, 578% e 1900%. Comparando-se os ganhos relativos de CBR

dos dois solos com a adição de cal, observa-se que as misturas com solo argiloso apresentam ganhos maiores que as misturas com solo arenoso. Este comportamento era o esperado devido a que os solos com maior fração fina normalmente apresentam maiores ganhos relativos de CBR quando são estabilizados com cal.

Comparando-se o CBR de misturas sem resíduo e com 40% de resíduo, observa-se que a adição de resíduo produz, para as misturas sem cal, uma diminuição relativa no CBR de 177% e 354%, respectivamente para os solos arenoso e argiloso. Para 5% de cal, a diminuição relativa é de, respectivamente 132% e 187%. E para as misturas com 10% de cal, a diminuição relativa é de respectivamente, 3% e 103%. Analisando-se o efeito da adição de resíduo no comportamento das misturas, conclui-se que este não melhora o comportamento das misturas. No entanto, destaca-se que os CBRs das misturas de ambos os solos, 40% de resíduo e 10% de cal são superiores a 60%, que é o valor mínimo para projeto de camada base de solo estabilizado granulometricamente.

Em relação à expansão, as **figuras 4.24 e 4.25** ilustram sua variação para as diversas misturas constituídas pelos solos arenoso e argiloso, respectivamente.

Figura 4.24 – Expansão em função do teor de cal para misturas de solo arenoso

Figura 4.25 – Expansão em função do teor de cal para misturas de solo argiloso

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.9** e as **figuras 4.24** e **4.25**, observa-se que ambos os solos sem adição de resíduo têm a expansão diminuída quando é adicionada cal, anulando-se a partir de teor de 5%. Segundo a *State of the art 5 – Lime Stabilization* (TRB, 1987) esta redução é geralmente atribuída à menor afinidade por água das argilas saturadas de cálcio e à formação de uma matriz cimentante que resiste à expansão volumétrica.

Quando é realizada esta mesma análise para as misturas com 40% de resíduo, observa-se que estas também apresentam uma diminuição da expansão quando se aumenta o teor de cal. Sendo que as misturas com solo arenoso alcançam 0% de expansão para o teor de 5% de cal e as misturas com solo argiloso apresentam uma expansão de 0,02% para o teor de 10% de cal.

Comparando-se a expansão das misturas sem resíduo e com 40% de resíduo, observa-se que a adição de resíduo produz um aumento na expansão, no entanto, observa-se que as expansões apresentadas não são elevadas. Destaca-se que só a mistura de solo argiloso e resíduo, sem adição de cal, apresenta uma expansão superior a 0,5%, que é o valor máximo permitido na norma do DER-SP para materiais de camada de base estabilizadas granulometricamente.

4.3.4.2 Influência do tempo de cura no CBR

Com base nos resultados dos ensaios com tempo de cura de 7 dias, foram escolhidas as misturas para se realizar os ensaios com os tempos de cura de 14 e 28 dias. A escolha baseou-se no critério do melhor comportamento, tendo sido então escolhidas as misturas constituídas pelos dois tipos de solos, 40% de resíduo e 10% de cal, as mesmas já contempladas anteriormente nos estudos da influência do tempo de cura nas resistências à compressão simples e diametral.

A **tabela 4.10** apresenta os resultados dos ensaios de CBR para 7, 14 e 28 dias de cura, dos quais respectivamente, durante 3, 10 e 24 dias, os corpos-de-prova foram mantidos na câmara úmida e nos últimos 4 dias foram imersos em água. A **figura 4.26** ilustra a variação do CBR ao longo do tempo de cura das misturas.

Tabela 4.10 – Índice de Suporte Califórnia e expansão aos 7, 14 e 28 dias de cura

Tempo de cura (dias)	Índice de suporte Califórnia			
	Solo arenoso		Solo argiloso	
	CBR (%)	Exp (%)	CBR (%)	Exp. (%)
7	61	0	88	0,02
14	150	0	136	0
28	202	0	150	0

Figura 4.26 – Variação do CBR com o tempo de cura para as misturas de solo, resíduo e cal

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.10** e a **figura 4.26**, observa-se que existe um aumento continuado do CBR com o aumento do tempo de cura para os dois tipos de solo. Este comportamento deve-se à reação pozolânica da cal com o solo e com o resíduo, a qual se desenvolve ao longo do tempo. Os máximos CBRs alcançados pelas misturas com os solos arenoso e argiloso são, respectivamente de 150% e 202%. Estes valores são especulativos visto que valores superiores a 100%, conforme destacado anteriormente, têm pouca utilidade prática e não são significativos como medidas de resistência ou estabilidade.

Analisando-se a evolução do CBR ao longo do tempo de cura, observa-se que sua taxa de aumento para o intervalo de 7 a 14 dias é de 13% e 7% ao dia, respectivamente para os solos arenoso e argiloso. E para o intervalo de 14 a 28 dias, a taxa de crescimento é de, respectivamente, 7% e 2% ao dia. Observa-se que as misturas com solo arenoso têm maiores ganhos de CBR com o tempo de cura que as misturas com solo argiloso. Este fato concorre para confirmar o comportamento já observado nos ensaios de compressão simples e diametral apresentados anteriormente.

Comparando-se os CBR das misturas com solo arenoso e argiloso em termos relativos, observa-se que para 7 dias de cura, o CBR da primeira mistura é 44% menor que da segunda. A **figura 4.26** mostra que, da mesma maneira que nos ensaios de resistência à compressão simples e diametral, as duas misturas alcançam um mesmo CBR aos 12 dias de cura. A partir deste ponto o CBR da mistura com solo arenoso ultrapassa a da mistura com solo argiloso, sendo que para os 14 e 28 dias de cura, a diferença é de respectivamente, 10% e 35%, a favor da primeira mistura. Isto mostra que as misturas com solo arenoso têm melhor comportamento ao longo do tempo que as misturas com solo argiloso.

Em relação à expansão, observa-se na **tabela 4.10** que esta é quase nula, devido, como destacado anteriormente a uma menor afinidade por água das argilas saturadas de cálcio e à formação de uma matriz cimentante que resiste à expansão volumétrica.

4.3.5 Relação da resistência à compressão simples e CBR

A partir dos resultados da totalidade dos ensaios executados, foram realizadas regressões lineares relacionam o CBR e a resistência à compressão simples para misturas sem adição de resíduo e com 40% de adição de resíduo, obtendo-se as **equações 4.3 e 4.4**, respectivamente. As **figuras 4.27 e 4.28** ilustram estas equações.

$$\text{CBR} = 0,111\text{RCS} + 11,099 \quad (4.3)$$

$$\text{CBR} = 0,158\text{RCS} - 21,927 \quad (4.4)$$

Onde:

CBR e RCS são respectivamente, o índice de suporte Califórnia em % e a resistência à compressão simples em kPa.

Figura 4.27 – Relação do CBR e a resistência à compressão simples das misturas sem adição de resíduo

Figura 4.28 – Relação do CBR e a resistência à compressão simples das misturas com adição de resíduo

Analisando-se as figuras 4.27 e 4.28 e os valores correspondentes dos coeficientes de determinação, observa-se que a relação entre o CBR e a resistência à compressão simples é linear e está bem delineada apenas para as misturas constituídas com 40% de resíduo. Destaca-se, ainda, que os coeficientes de determinação correspondentes às relações entre as resistências à compressão simples e compressão diametral são maiores que aquelas envolvendo o CBR. Supõe-se que isto se deva ao fato de que ambas as resistências são propriedades mecânicas dos materiais, enquanto o CBR é um índice estabelecido sobre bases empíricas.

4.3.6 Relação da resistência à compressão diametral e CBR

A partir dos resultados da totalidade dos ensaios executados, foram realizadas regressões lineares relacionam o CBR e a resistência à compressão diametral para misturas sem adição de resíduo e com 40% de adição de resíduo, obtendo-se as equações 4.5 e 4.6, respectivamente. As figuras 4.29 e 4.30 ilustram estas equações.

$$\text{CBR} = 0,298\text{RCD} + 23,435 \quad (4.5)$$

$$\text{CBR} = 0,266\text{RCD} - 2,273 \quad (4.6)$$

Onde:

CBR e RCD são respectivamente, o índice de suporte Califórnia em % e a resistência à compressão diametral em kPa.

Analisando-se as **figura 4.29 e 4.30** e os valores correspondentes dos coeficientes de determinação, observa-se que a relação entre o CBR e à resistências à compressão diametral é linear e esta bem delineada apenas para as misturas constituídas com 40% de resíduo. Este mesmo comportamento observou-se na relação do CBR com a resistência à compressão simples

Figura 4.29 – Relação do CBR e a resistência à compressão diametral das misturas sem adição de resíduo

Figura 4.30 – Relação do CBR e a resistência à compressão diametral das misturas com adição de resíduo

4.3.7 Análise de variância

4.3.7.1 Significância do tipo de solo, teor de resíduo e teor de cal

Com o objetivo de analisar os resultados dos ensaios para a determinação da resistência à compressão simples, resistência à tração indireta e CBR, fez-se um estudo de variância dos dados obtidos aos 7 dias de cura, verificando-se a significância da influência dos tipos de solo, teor de resíduo e teor de cal nos resultados dos experimentos, incluindo as interações entre esses fatores. O nível de confiança considerado foi 95%. Os resultados da análise são apresentados de forma detalhada no anexo C.

Nas tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 são listados os resultados das análises feitas para os ensaios de resistência à compressão simples, resistência à compressão diametral e CBR, respectivamente. Estas análises estão baseadas no teste F de Snedecor (GARCIA DIAS & PHILLIPS, 1995). Com base neste teste, uma base é considerada significativa quando o $F_{\text{teórico}}$ for inferior ao $F_{\text{calculado}}$, sendo o $F_{\text{teórico}}$ a razão dos graus de liberdade dos

tratamentos e dos graus de liberdade do erro. O $F_{\text{calculado}}$ representa a razão entre o quadrado médio do tratamento e o quadrado médio total.

As fontes de variação ou tratamentos A, B, C, AB, AC e BC apresentados nas tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 são enumeradas em seguida:

- A: da variação do tipo de solo (arenoso e argiloso);
- B: do teor de resíduo (0% e 40%);
- C: do teor de cal (0%, 5% e 10%)
- AB: do tipo de solo em conjunto com o teor de resíduo;
- AC: do tipo de solo em conjunto com o teor de cal e;
- BC: do teor de resíduo em conjunto com o teor de cal.

Tabela 4.11 – Influência das variáveis do estudo sobre a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura

Fonte de Variação	Graus de liberdade (GL)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio QM=SQ/GL	$F_{\text{calculado}}$	$F_{\text{teórico}}$	significativo?
A	1	246.678	246.678	142,83	4,13	sim
B	1	765	765	0,44	4,13	não
C	2	1.108.097	554.048	320,81	3,28	sim
AB	1	93.840	93.840	54,34	4,13	sim
AC	2	86.251	43.125	24,97	3,28	sim
BC	2	358.822	179.411	103,88	3,28	sim
Erro	26	44.903	1.727			
Total	35	1.939.356	55.410			

Tabela 4.12 – Influência das variáveis do estudo sobre a resistência à compressão diametral aos 7 dias de cura

Fonte de Variação	Graus de liberdade (GL)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio QM=SQ/GL	$F_{\text{calculado}}$	$F_{\text{teórico}}$	significativo?
A	1	41.957	41.957	193,31	4,13	sim
B	1	38.220	38.220	176,10	4,13	sim
C	2	259.154	129.577	597,02	3,28	sim
AB	1	5.501	5.501	25,34	4,13	sim
AC	2	15.403	7.701	35,48	3,28	sim
BC	2	156.790	78.395	361,20	3,28	sim
Erro	26	5.643	217			
Total	35	522.667	14.933			

Tabela 4.13 – Influência das variáveis do estudo sobre o CBR aos 7 dias de cura

Fonte de Variação	Graus de liberdade (GL)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio QM=SQ/GL	F _{calculado}	F _{teórico}	significativo?
A	1	247	247	86	4,84	sim
B	1	1.232	1.232	430	4,84	sim
C	2	8.273	4.136	1.445	3,98	sim
AB	1	13	13	4,5	4,84	não
AC	2	433	216	76	3,98	sim
BC	2	1.088	544	190	3,98	sim
Erro	2	6	3			
Total	11	11.291	1.026			

Analisando-se a **tabela 4.11**, observa-se que a variação do tipo de solo (A), teor de cal (C), a interação entre a variação do tipo de solo e o teor de resíduo (AB), a interação entre a variação do tipo de solo e o teor de cal (AC) e a interação entre a variação do teor de resíduo e o teor de cal (BC), influenciam de maneira significativa os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples. Isto é constatado nas análises feitas anteriormente neste capítulo.

Ainda, segundo a **tabela 4.11**, observa-se que a variação do teor de resíduo (B) mostra-se pouco significativa nos resultados de resistência à compressão simples, contrariando as análises realizadas anteriormente no **item 4.3.1**. Entretanto, quando se observa a interação do teor de resíduo com o tipo de solo (AB) e o teor de cal (BC), estas são significantes. O teor de resíduo (B) ainda se mostra significativa nos resultados dos ensaios a compressão diametral e CBR, conforme apresentado nas **tabelas 4.12 e 4.13**, respectivamente. Assim, baseando-se em argumentação de Walpole *et al* (1999), a explicação para a incongruência em pauta dar-se-ia em razão das somas dos efeitos para cada fator B serem de magnitudes parecidas ou seja, a presença da interação dos fatores encobriria o efeito da variável considerada.

Na **tabela 4.12**, observa-se que todos os fatores influenciam de maneira significativa os resultados dos ensaios de resistência à tração indireta, isto é verificado nas análises feitas anteriormente neste capítulo que apresentam os resultados do ensaio de resistência à tração indireta mais sensíveis à variação

do teor de cal e de resíduo que os resultados dos ensaios de compressão simples.

Na **tabela 4.13**, observa-se que a variação da interação entre o tipo de solo e teor de resíduo (AB) não é significativa no ensaio de CBR para um grau de confiabilidade de 95%, esta variação só seria significativa para um grau de confiabilidade de 93,9%, isto provavelmente deve-se a que por 40% do peso seco do solo ser substituído na mistura por resíduo, o tipo de solo não teria tanta influência quanto os outros fatores.

4.3.7.2 Significância do tipo de solo e tempo de cura

Foram analisados os resultados dos ensaios para a determinação das resistências à compressão simples e compressão diametral, fez-se um estudo de variância, verificando-se a significância da influência dos tipos de solo e tempos de cura. A **tabela 4.14** apresenta os resultados das análises feitas para estes ensaios. O nível de confiança considerado foi de 95%. Os resultados da análise são apresentados de forma detalhada no anexo C.

As fontes de variação ou tratamentos A, E e AE apresentados na **tabela 4.14** são, respectivamente, a influência sobre as resistências às compressões simples e diametral dos fatores e sua interação enumeradas em seguida:

- A: da variação do tipo de solo (arenoso e argiloso);
- E: do tempo de cura (3, 7 e 28 dias) e;
- AE: do tipo de solo em conjunto com o tempo de cura.

Tabela 4.14 – Influência do tipo de solo e tempo de cura nas resistências à compressão simples e compressão diametral

Fonte de var.	Grau de lib.	Soma de quadrados		Quadrado médio		F ₀		F _{0,05}	Significativo?	
		RCS (SQ ₁)	RCD (SQ ₂)	RCS SQ ₁ /GL	RCD SQ ₂ /GL	RCS	RCD		RCS	RCD
A	1	9,66E3	6,46E3	9,66E3	6,46E3	15	9	4,75	sim	sim
E	2	1,24E6	4,13E5	6,21E5	2,06E5	943	283	3,59	sim	sim
AE	2	3,39E5	1,67E5	1,69E5	8,39E4	257	115	3,59	sim	sim
Erro	12	7,91E1	8,76E3	6,59E2	7,31E2					
Total	17	1,60E6	5,96E5	9,41E4	3,51E4					

Analisando-se a **tabela 4.14**, observa-se que a variação do tipo de solo, tempo de cura e a interação entre a variação do tipo de solo e do tempo de cura influenciam de maneira significativa os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e compressão diametral. Isto é constatado nas análises feitas anteriormente neste capítulo.

4.4 ESTUDO DA FORMAÇÃO DE CRISTAIS NA SUPERFÍCIE DOS CORPOS-DE-PROVA

Foi realizado um estudo anterior à presente pesquisa utilizando misturas constituídas com o resíduo da fabricação de pasta de celulose, cal e um solo com 60% de finos, classificado como CL e A-7-6, respectivamente através da classificação unificada e HBR. Na ocasião observou-se que os corpos-de-prova deixados no ambiente do laboratório, sem nenhum tipo de proteção, apresentavam a formação de cristais em suas superfícies. Supõe-se que tais formações sejam decorrentes de um processo de cristalização de sais de sódio, cálcio e magnésio presentes no resíduo. Os cristais acumulavam-se ao longo do tempo e, decorridas de 3 a 4 semanas, ocorria a desagregação dos corpos-de-prova.

A **figura 4.31** ilustra o processo de formação de cristais em corpos-de-prova constituídos por solo (65%, 60% e 45%), resíduo (35%, 35% e 45%) e cal (0%, 5% e 10%) logo após serem submetidos a ensaios de compressão diametral (a) e 3 dias (b) e 21 dias (c) após a realização deste ensaio seguido de exposição ao ar. Destaca-se que os corpos-de-prova foram submetidos a cura selada por 3 dias em câmara úmida preliminarmente à realização dos ensaios de compressão diametral.

Analisando-se a **figura 4.31**, observa-se que os corpos-de-prova logo após realização dos ensaios de compressão diametral (a) ainda não apresentavam a formação de cristais. Após 3 dias de exposição ao ar (b), os cristais já se destacam, sendo que após 21 dias (c) os corpos-de-prova encontram-se parcialmente desagregados. Ainda nesta figura, quando se comparam os corpos-de-prova com teores de resíduo de 35% e 45%, para

estes últimos a formação de cristais ocorre de maneira mais intensa tanto para os 3 dias, como para os 21 dias de exposição ao ar (b e c), indicando que a presença do resíduo tem influência neste fenômeno.

a) Corpos-de-prova depois de extraídos do molde de compactação.

b) Corpos-de-prova após 3 dias de exposição ao ar.

c) Corpos-de-prova após 21 dias de exposição ao ar.

Figura 4.31 – Desagregação superficial dos corpos-de-prova quando são expostos ao ar

Acredita-se que a formação de cristais deva-se à perda de umidade dos corpos-de-prova por evaporação, que promoveria a concentração dos sais na superfície do corpo-de-prova e sua conseqüente cristalização. Para investigar este fato, ainda no estudo preliminar, dois dos corpos-de-prova constituídos por 60% de solo, 35% de resíduo e 5% de cal foram submetidos a duas condições de cura onde não ocorreriam perdas de umidade. A **figura 4.32** ilustra esses corpos-de-prova, em que o primeiro deles foi deixado 21 dias na câmara úmida (a) e o segundo foi embrulhado com filme de PVC e deixado 21 dias no ambiente do laboratório (b).

Analisando-se a **figura 4.32**, não se observa a formação de cristais nas superfícies dos corpos-de-prova, corroborando com a suposição de que é a evaporação da água com a conseqüente concentração de sais o principal motivo da formação dos cristais.

Figura 4.32 – Corpo-de-prova após 21 dias na câmara úmida (a) e corpo-de-prova embrulhado em filme de PVC após 21 dias de deixado no ambiente do laboratório (b)

A constatação da formação de cristais na superfície dos corpos-de-prova no estudo preliminar motivou a continuidade da análise deste aspecto durante o presente estudo. Destaca-se que os resíduos utilizados nos dois estudos foram coletados em pilhas de estocagem diversas, podendo não apresentar exatamente as mesmas características. Os solos também são diversos, sendo que o solo argiloso utilizado nesta fase do estudo contém uma porcentagem menor de finos e é menos plástico que o utilizado preliminarmente.

Em continuidade ao estudo anterior, foi então observado o comportamento, durante 21 dias de exposição ao ar, de corpos-de-prova constituídos com os solos arenoso e argiloso, resíduo e cal, mantendo-se fixa em 40% a quantidade de resíduo. A **figura 4.33** apresenta o aspecto de três corpos-de-prova constituídos de 60% de solo argiloso e 40% de resíduo (a); 55% de solo argiloso, 40% de resíduo e 5% de cal (b); e 50% de solo argiloso, 40% de resíduo e 10% de cal (c) ao final dos 21 dias.

Figura 4.33 – Influência do teor de cal na formação de cristais nos corpos-de-prova expostos ao ar. (a) Solo e resíduo; (b) solo, resíduo e 5% de cal; (c) solo, resíduo e 10% de cal

Analizando-se a **figura 4.33**, observa-se que a formação de cristais diminui à medida que o teor de cal aumenta, assim o corpo-de-prova sem adição de cal apresentam uma cristalização bastante significativa, enquanto que para o corpo-de-prova com 10% de cal, esta cristalização é muito menos notável. Deve-se destacar que embora o corpo-de-prova com 5% de cal aparente apresentar uma maior formação de cristais que os demais, trata-se apenas de uma coloração branca desenvolvida na sua superfície.

Supõe-se que a diminuição da formação de cristais que ocorre com o aumento do teor de cal deva-se aos efeitos que esta promove na mistura, ou seja, uma ação cimentante que minimiza a segregação de sais solúveis, um aumento do pH, o que dificulta a formação de cristais, e ainda um acréscimo na concentração de íons de cálcio e uma diminuição na concentração de íons de sódio, conforme a explicação levantada por Tuncer & Basma (1991) para reações envolvendo a estabilização de solos coesivos com cal. Destaca-se que o comportamento observado para as misturas com o solo arenoso foi muito similar ao comportamento das misturas com o solo argiloso, evidenciando a pouca influência do tipo de solo no fenômeno.

Comparando-se as **figuras 4.31 e 4.33**, que apresentam, respectivamente, os corpos-de-prova dos estudos preliminar e atual, observa-se que estes últimos estão menos degradados que os primeiros aos 21 dias de exposição ao ar, indicando que a intensidade com que se deu a formação de cristais difere nas duas etapas da pesquisa. Acredita-se que isto se deva a que os primeiros corpos-de-prova só foram curados 3 dias antes de serem

expostos ao ar, enquanto os outros foram curados 28 dias na câmara úmida antes da exposição ao ar, o que resultaria, neste caso, em uma maior cimentação das partículas, que dificultaria a formação de cristais. Este fato mostraria que posteriormente ao período de construção das camadas de base ou sub base, o efeito da formação de cristais sob o desempenho do pavimento seria cada vez menos significativo devido ao aumento da cimentação nas camadas impermeabilizadas.

Numa próxima etapa, foram executados ensaios de difração de raios-X (DRX) no Instituto de Física de São Carlos/USP visando determinar os elementos químicos presentes no resíduo puro e nos cristais formados na superfície dos corpos-de-provas após exposição ao ar. Os ensaios realizaram-se a partir de amostras dos materiais e corpos-de-prova utilizados no estudo preliminar. A **tabela 4.15** apresenta os resultados de DRX para amostras do resíduo puro seco ao ar e deste mesmo resíduo re-hidratado e posteriormente seco em estufa à temperatura de 50°C. Complementarmente, foram ensaiadas amostras de cristais provenientes da superfície de dois corpos-de-provas compactados na ω_o e ρ_{dmax} , sendo o primeiro constituído com 65% de solo e 35% de resíduo e o outro, constituído com 60% de solo, 35% de resíduo e 5% de cal. Ambos os corpos-de-prova haviam sido ensaiados à compressão diametral após 3 dias de cura e, em seguida, expostos ao ar por 20 dias.

Tabela 4.15 - Elementos químicos inorgânicos constituintes do resíduo, da mistura de resíduo e solo, da misturas de resíduo, solo e cal

Elemento químico inorgânico	Resíduo puro seco ao ar (%)	Resíduo puro re-hidratado (%)	Cristais de c.p. exposto ao ar; 65% solo; 35% resíduo (%)	Cristais de c.p. exposto ao ar; 60% solo; 35% resíduo; 5% de cal (%)
Cálcio (Ca)	81,23	77,97	37,95	38,51
Sódio (Na)	10,61	10,96	30,99	31,70
Magnésio (Mg)	4,29	4,66	3,18	7,01
Enxofre (S)	2,79	3,04	6,37	7,53
Sílicio (Si)	0,78	0,82	5,09	3,68
Alumínio (Al)	-	1,08	6,94	4,93
Fósforo (P)	-	0,51	-	-
Potássio (K)	-	0,65	0,51	0,46
Ferro (Fe)	-	-	7,98	5,59
Tilênio (Ti)	-	-	0,98	0,60

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.15**, observa-se que o resíduo puro é constituído principalmente por cálcio, sódio e magnésio, elementos que formam os diversos tipos de sais presentes no resíduo. Destaca-se que o resíduo puro nas duas condições analisadas não apresenta a formação de cristais e que a constituição química de ambos não diferem significativamente. Assim nas análises que se seguem, ambos os materiais serão considerados indistintamente.

Dentre os elementos constituintes dos cristais, destacam-se o cálcio e o sódio, com uma quantidade aproximadamente de 2/3 do total, conforme mostrado na **tabela 4.15**. Observa-se ainda que a adição de cal influi muito pouco na constituição dos cristais. Outros elementos presentes nos cristais, como o silício, alumínio e ferro, são comumente encontrados em solos semelhantes ao utilizado na pesquisa preliminar.

A **tabela 4.16** apresenta a porcentagem de cálcio e sódio presente no resíduo puro, a porcentagem com que estes elementos entram na composição das misturas ("porcentagem no resíduo puro x 35%"), a porcentagem dos dois elementos presentes nos cristais originados após exposição das misturas ao ar e o crescimento relativo da quantidade dos mesmos, quando se comparam com o resíduo puro.

Tabela 4.16 – Variação relativa do teor de elementos químicos inorgânicos entre o resíduo puro e os cristais dos corpos-de-prova com e sem adição de cal

Elemento químico inorgânico	Resíduo puro (%)	Resíduo puro x 0.35 (%)	Cristais 65% solo e 35% resíduo (%)	Ganho relativo (%)	Cristais 60% solo; 35% resíduo; e 5% de cal. (%)	Ganho relativo (%)
Cálcio (Ca)	81,2	28,4	37,95	34	38,51	36
Sódio (Na)	10,61	3,7	30,99	738	31,7	757

Analisando-se os valores apresentados na **tabela 4.16**, observa-se que apesar das quantidades de cálcio e sódio presentes nos cristais serem da mesma ordem, este último elemento contribui, proporcionalmente, de maneira muito mais efetiva na formação dos cristais, visto que a quantidade de sódio

presente na mistura é muito menor que a de cálcio, valor este de aproximadamente 13%. Assim, comparando-se os dois elementos, proporcionalmente, a contribuição do sódio é 21 vezes maior que a do cálcio. Este comportamento é explicado por Dorrnoso (2001) como sendo decorrente do fato de que os sais de sódio são muito mais solúveis que os sais de cálcio.

Além da determinação dos elementos químicos, foram também executados ensaios de microscopia eletrônica por varredura (MEV) para determinar a micro-estrutura do resíduo e dos cristais. As amostras utilizadas sem cristais aparentes foram as seguintes: resíduo puro seco ao ar sem compactar; resíduo puro re-hidratado e posteriormente seco em estufa a temperatura constante de 50°C sem compactar; e material proveniente do corpo-de-prova constituído com 65% de solo e 35% de resíduo, curado na câmara úmida por 20 dias. Também foram ensaiadas amostras dos cristais provenientes de dois corpos-de-prova, o primeiro constituído com 65% de solo e 35% de resíduo, e o outro constituído com 60% de solo, 35% de resíduo, 5% de cal. Estes dois últimos foram ensaiados a compressão diametral após 3 dias de cura e em seguida expostos ao ar por 20 dias.

A **figura 4.34** apresenta as microfotografias do resíduo puro seco ao ar com aumentos de 1.000X e 10.000X. Na microfotografia com aumento de 1.000X, observa-se que as partículas do resíduo são principalmente arredondadas, sendo ainda observados alguns cristais tabulares alongados. Para o aumento de 10.000X, observam-se, mais detalhadamente, as partículas arredondadas e os espaços vazios existentes entre elas. Estas partículas têm forma similar às partículas de solo calcário apresentadas no trabalho de Bhuiyan (1995).

Figura 4.34 – Micro-estrutura do resíduo puro seco ao ar sem compactar

A **figura 4.35** mostra as microfotografias do resíduo re-hidratado e posteriormente seco em estufa a temperatura constante de 50°C com aumentos de 1.000X e 10.000X. Na microfotografia com aumento 1.000X, observam-se partículas arredondadas, porém sem a presença de cristais tabulares, como os observados na **figura 4.34**. Na microfotografia com aumento de 10.000X, aparecem pequenos cristais na superfície das partículas arredondadas, que não estão presentes no resíduo não re-hidratado (**Figura 4.34**).

Figura 4.35 – Micro-estrutura do resíduo puro re-hidratado e posteriormente seco na estufa a 50°C

A **figura 4.36** apresenta as microfotografias com aumentos de 1.000X e 10.000X da amostra proveniente do corpo-de-prova constituído com 65% de solo e 35% de resíduo deixado na câmara úmida por vinte dias, ou seja, que não apresentava formação de cristais visíveis a olho nu na superfície. Nestas microfotografias observa-se a presença de partículas arredondadas muito semelhantes às observadas na **figura 4.34**, corroborando o fato de que não existe formação de cristais nos corpos-de-prova deixados na câmara úmida.

Figura 4.36 – Micro-estrutura da amostra proveniente do corpo-de-prova constituído com 65% de solo e 35% de resíduo deixado 20 dias na câmara úmida

A **figura 4.37** apresenta as microfotografias com aumentos de 1.000X e 10.000X da amostra proveniente do corpo-de-prova constituído com 35% de resíduo e 65% de solo exposto ao ar por 20 dias, ocasião em que apresentava formação de cristais superficiais. Analisando-se a microfotografia com aumento de 1.000X, observa-se a presença de cristais com forma de agulhas, com tamanhos variáveis e dispostos de forma desordenada. Na microfotografia com aumento 10.000X, observa-se que os cristais são alongados e de seção retangular.

Figura 4.37 – Micro-estrutura dos cristais do corpo-de-prova constituído com 65% de solo e 35% de resíduo exposto ao ar

A **figura 4.38** apresenta as microfotografias com aumentos de 1.000X e 10.000X da amostra proveniente do corpo-de-prova constituído com 60% de solo, 35% de resíduo e 5% de cal exposto ao ar. Analisando-se as microfotografias apresentadas, observa-se que esta amostra apresenta cristais mais ordenados e com menor volume de espaços vazios que as provenientes do corpo-de-prova sem adição de cal. Supõe-se que isto se deva aos efeitos aglomerante e cimentante da cal, que como se destacou anteriormente, reduz a formação de cristais.

Figura 4.38 – Micro-estrutura dos cristais do corpo-de-prova constituído com 60% de solo, 35% de resíduo e 5% de cal exposto ao ar

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo principal deste trabalho foi estudar as propriedades mecânicas de misturas constituídas com resíduo da fabricação de papel e solo, através da determinação das resistências à compressão simples, tração indireta e índice de suporte Califórnia. Complementarmente, foi analisada a composição química e a micro-estrutura do resíduo antes e depois de misturada ao solo a partir de ensaios de difração de raios-X e microfotografias, respectivamente.

5.2 CONCLUSÕES

Analisando-se os parâmetros de compactação, constatou-se que a adição do resíduo produz a diminuição da massa específica seca máxima e o aumento da umidade ótima. Sendo que este efeito é maior para as misturas constituídas com solo arenoso que para as misturas constituídas com solo argiloso. Isto se deve ao fato de que o efeito relativo da adição de resíduo na alteração da composição granulométrica das misturas com solo arenoso é maior que a alteração produzida nas misturas com solo argiloso. Por outro lado, a adição ou aumento do teor de cal também produz a diminuição da massa específica seca máxima e o aumento da umidade ótima.

Foi observado que as resistências à compressão simples, tração indireta e CBR até os 7 dias de cura, para ambos os solos e sem adição de resíduo, aumentam quando é adicionada cal, sendo que os maiores valores apresentam-se para o teor de 5% de cal e não para o teor de 10%. Este fato

revela que adição de cal é favorável até determinado limite, a partir do qual, novos acréscimos conduzem à queda das resistências e do CBR.

Entretanto, as misturas com 40% de resíduo apresentam ganhos crescentes das resistências e do CBR quando se aumenta o teor de cal até 10%. A explicação para esta diferença reside no fato de que a cal reage principalmente com a fração fina dos materiais e, no caso dos solos, a disponibilidade de finos para a reação com 10% de cal já estaria esgotada, o que não aconteceria com a mistura com resíduo, que conta com uma parcela significativamente maior de finos.

Concluiu-se que o efeito positivo da adição de resíduo no comportamento das misturas só foi verificado para o teor de cal de 10%, não se justificando para teores menores, a não ser que na análise também sejam considerados fatores ambientais. Considerando-se a média para ambos os solos, as máximas resistências à compressão simples e tração indireta alcançadas pelas misturas sem resíduo são da ordem de 76% e 40% das máximas resistências alcançadas pelas misturas com resíduo respectivamente. Entretanto observou-se que no CBR o efeito da adição de resíduo não melhora o comportamento das misturas com e sem adição de cal.

Constatou-se que o aumento no tempo de cura produz um aumento contínuo nas resistências à compressão simples, tração indireta e CBR, para as misturas constituídas com 10% de cal, 40% de resíduo e 50% de solo. Supõe-se este comportamento seja decorrente da reação pozolânica da cal com o solo e com o resíduo a qual se desenvolve ao longo do tempo.

Verificou-se que nos ensaios de compressão simples e tração indireta, as misturas com solo arenoso têm maiores ganhos de resistência com o tempo de cura que as misturas com solo argiloso. Isto se deve ao fato da ação cimentante da cal sobre materiais calcários ser muito efetiva, assim, tendo em vista que o resíduo utilizado é essencialmente calcário, o melhor comportamento das misturas com solo arenoso deve-se a que a fração fina do

solo argiloso consumiria uma parcela elevada da cal disponibilizada, restando pouco para reagir com o resíduo presente na mistura.

Constatou-se que a resistência à compressão diametral é muito mais sensível ao efeito positivo da adição da cal que a resistência à compressão simples nas misturas com adição de resíduo, mostrando que a reação do resíduo com a cal contribui muito efetivamente para o ganho de resistência à tração, indicando que a mesma promove um efeito cimentante considerável.

Observou-se que a adição de cal aos solos sem resíduo não produz variação do ângulo de atrito e apenas promove o aumento da coesão. Entretanto, a adição de resíduo contribui para a diminuição do ângulo de atrito, mas, ao mesmo tempo, a reação deste material com a cal, produz um ganho da coesão bastante expressivo. Destaca-se que o máximo valor de coesão alcançado pelas misturas sem resíduo é da ordem de 57% do máximo valor alcançado pelas misturas com resíduo.

Foi observado que a adição de resíduo produz um aumento da expansão, mas não muito elevado. Só a mistura de solo argiloso e resíduo, sem adição de cal, apresentou uma expansão superior a 0,5%, que é o valor máximo permitido na norma do DER-SP para materiais de camada de base estabilizadas granulometricamente.

Na análise de variância feita para as resistências à compressão simples, tração indireta e CBR verificou-se que a influência do tipo de solo, teor de cal, teor de resíduo e tempo de cura é significativo para um nível de confiança de 95%. Excetuando-se a influência da adição de resíduo sob os resultados de resistência à compressão simples. Porém, considerando as análises realizadas no **item 4.3.1.**, a incongruência em pauta dar-se-ia em razão das somas dos efeitos serem de magnitudes parecidas, ou seja, que a presença da interação dos fatores encobriria o efeito da variável considerada.

Observou-se que os corpos-de-prova deixados no ambiente do laboratório, sem nenhum tipo de proteção, apresentam a formação de cristais

em suas superfícies. Supõe-se que tais formações sejam decorrentes de um processo de cristalização de diversos sais presentes no resíduo. Os cristais acumulam-se ao longo do tempo e resultam na desagregação dos corpos-de-prova. Ainda foi verificado que os corpos-de-prova deixados na câmara úmida ou embrulhados com filme de PVC no ambiente do laboratório não apresentam formação de cristais. Acredita-se, portanto, que o principal motivo para a formação de cristais seja a perda de umidade dos corpos-de-prova por evaporação, que promoveria a concentração dos sais na superfície do corpo-de-prova e sua consequente cristalização.

Observou-se que a formação de cristais diminui à medida que o teor de cal aumenta. Supõe-se que isto se deva aos efeitos que a cal promove nas misturas, ou seja, tem uma ação cimentante que minimiza a segregação de sais solúveis, também aumenta o pH e conduz a um acréscimo na concentração de íons de cálcio e a uma diminuição na concentração de íons de sódio dificultando a formação de cristais. Destaca-se que o comportamento observado para as misturas com o solo arenoso foi muito similar ao comportamento das misturas com o solo argiloso, evidenciando a pouca influência do tipo de solo no fenômeno.

Foi observado que quando se aumenta o tempo de cura dos corpos-de-prova antes da exposição ao ar, a formação de cristais diminui. Acredita-se que isto se deva à maior cimentação das partículas promovida pela cal ao longo do tempo, o que dificultaria a formação de cristais. Este fato mostraria que posteriormente ao período de construção das camadas de base ou sub base, o efeito da formação de cristais sobre o desempenho do pavimento seria cada vez menos significativo devido ao aumento da cimentação nas camadas impermeabilizadas.

Verificou-se que os principais elementos que constituem os cristais são o cálcio e o sódio, que representam 2/3 do total. Observou-se também que, apesar das quantidades de cálcio e sódio presentes nos cristais serem da mesma ordem, este último elemento contribui de maneira muito mais efetiva

na formação dos cristais. Assim, comparando-se os dois elementos, proporcionalmente, a contribuição do sódio é 21 vezes maior que a do cálcio.

Acredita-se que as camadas de base e sub-base estabilizadas com cal, confinadas e impermeabilizadas, sofreriam pouca influência da formação de cristais originados pela adição de resíduo.

Finalmente, conclui-se que a adição de resíduo da produção de pasta de celulose aos solos não melhora as propriedades mecânicas das misturas compactadas, necessitando a adição de um estabilizante, como a cal, para melhorar as más características. Porém, para os solos estudados, as misturas com resíduo e cal apresentaram melhor comportamento mecânico que as misturas de solo-cal, oferecendo uma solução factível para a utilização deste resíduo na construção rodoviária.

5.3 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ampliar a pesquisa para outros tipos de solos, outros tipos de estabilizantes e maiores tempos de cura, que permitam avaliar o comportamento a longo prazo e a durabilidade do material.

Procurar teores ótimos de cal em função do teor de resíduo e tipo de solo, comparando-se as resistências máximas das misturas com resíduo com as misturas sem resíduo.

Avaliar métodos alternativos para reduzir a formação de cristais, tais como, dupla aplicação de cal, cura das misturas antes da compactação, a utilização de outros estabilizantes, etc.

Determinar a influência do tempo de armazenagem e homogeneidade do resíduo descartado nas diversas indústrias de fabricação de papel no Brasil.

Além do estudo da resistência, avaliar o comportamento das misturas com resíduo da fabricação de papel a partir da análise da deformabilidade e estabilidade frente à ação da água.

Avaliar o comportamento das misturas de resíduo, solo e cal, em campo, através da construção de trechos experimentais e seu monitoramento ao longo do tempo, que permita estimar seu desempenho e problemas construtivos.

Avaliação econômica e ambiental das vantagens e desvantagens da aplicação do resíduo na construção rodoviária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTO C. O. FILHO; FERMIANO M. FERNANDEZ; NEI R. LIMA; NIVIO DUTRA; WENDERLEY RAMOS. (1997). Resíduos sólidos gerados diretamente dos processos industriais. In: CONGRESSO ANUAL DA CELULOSE E PAPEL. 30º., 1997, São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6508: Grãos de solo que passam a peneira 4.8mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). NBR 7175: Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 10004: Resíduos sólidos. Fórum Nacional de Normalização.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 10005: Lixiviação de resíduos. Fórum Nacional de Normalização.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 10006: Solubilização de resíduos. Fórum Nacional de Normalização.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 10007: Amostragem de resíduos. Fórum Nacional de Normalização.
- BASMA A. A.; TUNCER R. E. (1991). Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. In TRANSPORTATION RESEARCH RECORD. 1295., 1991, p 52-61.
- BHUIYAN, J.U.; DALLAS, N. L.; GRAVES, R.E. (1995). Evaluation of calcareous base course materials stabilized with low percentage of lime in South Texas. In: Transportation Research Board, nº.1486,1995, p.77-87.
- BIERMANN, C. J. (1993). Essentials of pulping and papermaking. San Diego: Academic Press.Inc.
- BRACELPA, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (2001). Números do setor. Disponível em <http://www.bracelpa.org.br/>. Acesso em: Março 2003.
- BRACELPA, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (2004). Desempenho do setor em 2003. Disponível em <http://www.bracelpa.org.br/>. Acesso em: Janeiro 2004.
- BRACELPA, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (2004). Estatística mensal Janeiro a dezembro, produção 2003. Disponível em <http://www.bracelpa.org.br/>. Acesso em: Janeiro 2004.
- CANADIAN ENVIRONMENTAL PROTECTION (1991). Act Priority Substances List Assessment, Report Nº. 2, Effluents from Pulp Mills Using Bleaching. Health and Welfare. Ontario, Canadá. Disponível em: <http://www.rfu.org/index.htm>. Acesso em: março 2003.
- CASTRO E., ANTONIO SERAFIN LUIS (1974). O solo-cal na pavimentação de estradas e aeródromos. In: REVISTA DA SOCIEDADE PORTUGUESA DE GEOTECNIA, nº10, 1974.
- DANTAS H.S. (1970). Estabilização de solos com emprego da cal - Tentativa de especificação de construção. Instituto de pesquisa rodoviária, publicação 462, 1970, Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1991) DER-SP ES 301 – Sub base estabilizada granulometricamente. São Paulo.

- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (1991) DER-SP ES 303 – Base estabilizada granulometricamente. São Paulo.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1996). CLA259-96. Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro.
- DORRONOSO C. (2001). Contaminación por Sales solubles. Departamento de edafologia e química agrícola da universidade de Granada Espanha, Unidade investigadora da faculdade de ciências. Disponível em: <http://edafologia.ugr.es/conta/Tema12/anchor4689615#anchor4689615>. Acesso em: Outubro de 2003
- EADES J. L.; e GRIM, R. E. (1960). Um ensayo rápido para determinar los requerimentos de cal em la estabilización de suelos com cal. Tradução da S.A. Canteras el Sauce – Buenos Aires (1967).
- EL-RAWI N. M., AWAD A. A. (1981). Permeability of lime stabilized soils, In: TRANSPORTATION ENGINEERING JOURNAL, ASCE, vol 107, nº TE1, 1981, pp 25-35.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) OFFICE OF OMPLIANCE SECTOR NOTEBOOK PROJECT (1995). Profile of the pulp and paper industry. September. Washington, DC. Disponível em www.epa.gov/oeca/sector.
- GARCIA-DIAZ, A.; PHILLIPS, D. T. (1995). Principles of experimental desing and analysis. Chapman & Hall. Londres.
- GRAVES, R. E. (1987). Strength developed from carbonate cementation in silica/carbonate systems as influenced by cement-particle mineralogy. M.S thesis. University of Florida.
- GUIMARÃES J. E. P. (1971). Estabilização de solos, nova e importante aplicação da cal seus conceitos e suas vantagens. Associação dos produtores de cal.
- KENNEY, T.W., HUDSON W.R. (1968). Application of the indirect Tensile Test to stabilized materials, H.R record Nº 235.
- LAHTINEN, P. (2001). Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads. FINNRA reports 70/2001. Helsinque, Finlândia. Disponível

em: <http://lib.hut.fi/Diss/2001/isbn9512257076/isbn9512257076.pdf>. Acesso em: março 2003.

MENDONÇA A.A., CARDOSO D.D., BUENO, B.D., FONTES M.P.F. (1997). Efeito da temperatura de cura na resistência à compressão simples de um latosolo e de um solo saprolítico estabilizados com cal. 1º Simpósio internacional de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego. Rio de Janeiro Outubro.

MENDONÇA A.A., CARDOSO D.D., BUENO B.D., FONTES M.P.F. (1997). Resistência à compressão simples e a compressão diametral de misturas de solo cal: estudo dirigido a dois solos típicos de Viçosa. 1º Simpósio internacional de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego. Rio de Janeiro. Outubro.

MOO-YOUNG, H.K.; ZIMMIE, T.F (1996). Geotechnical properties of paper mill sludges for use in landfill covers. In: Journal of geotechnical engineering, v.122, n.9, p. 768-775, September.

NOLASCO, A.M. (1993). Utilização de resíduos da indústria de papel na produção de materiais para construção civil. Dissertação de mestrado. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 140.

ORGANIZAÇÃO DE NAÇÕES UNIDAS, ONU. (2003). Forest products annual market analysis 2002-2004, Timber Bulletin Volume LVI Nº 3. Genebra.

PETERS C.S. (1998). Investigative and Management Techniques for Cement Kiln Dust and Pulp and Paper Process Wastes," Environmental Progress, vol. 17, no. 3, pp. 142-147. Disponível em "Beneficial Use of Solid Waste in Maine." 07 May 2002. <http://useit.umeciv.maine.edu/>. acesso em: janeiro 2004.

PHILIPP P. D., ALMEIDA O.M.L. (1988) Celulose e papel, tecnologia de fabricação da pasta celulósica, vol I, Publicação IPT. São Paulo.

REACH FOR UNBLEACHED (1997). What we know about sludge, grate ash and lime dregs. Disponível em: <http://rfu.org/MonSolid.htm>. Acesso em: Março 2003.

ROAD TRANSPORT RESEARCH (1997). Recycling strategies for road works. Organisation for economic co-operation and development. Paris.

- SIMSON C.R., KELLING K.A., LIEGEL E.A. (1981), "Papermill Lime-Sludge as an Alternative Liming Material," *Agronomy Journal*, vol. 73, no. 6, pp. 1003-1008. Disponível em "Beneficial Use of Solid Waste in Maine." 07 May 2002. <http://useit.umeciv.maine.edu/>. acesso em: janeiro 2004
- THOMPSON M.R. (1969). Mixture dexing for lime-treated Soils. Civil Engineering Series, Highway Engeeniering Series No 26, University of Illinois, 24 p.,1969.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1987). State of the art 5 - Lime Stabilization Reactions, properties, design, and construction. Washington, D.C.
- TUNCER E. R., BASMA A. A. (1991). Stregth and stress-strain characteristics of lime-treated cohesive soil. In *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD*. 1295., 1991, pp 70-79.
- WALPOLE R.E., MYERS R.H, MYERS, S.L. (1999). Probabilidade y estadística para ingenieros, Sexta edição Prentice may Inc
- ZHOU, H.; SMITH, W.D. SEGO, D.C. (1999). Characterization and use of pulp Mill fly ash and lime by-products as road construction amendments. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.27, p. 581-593.

- ANEXO A -

**RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE
SUPORTE CALIFÓRNIA, RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO SIMPLES E RESISTÊNCIA À
TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Tabela A1 – CBR das misturas dos solos arenoso laterítico, argiloso laterítico, resíduo e cal aos 7 dias de cura

Tipo de solo	Mistura %solo-%resíduo-%cal	CBR (%)	Expansão (%)	Grau de compactação (%)	w_o [%]	w_m [%]
Arenoso Laterítico	100-0-0	25%	0,02%	98,9%	11,1%	10,9%
	95-0-5	86%	0,00%	99,1%	12,5%	12,3%
	90-0-10	63%	0,00%	100,4%	15,1%	15,1%
	60-40-0	9%	0,75%	100,3%	20,0%	19,8%
	55-40-5	37%	0,00%	98,9%	23,2%	23,1%
	50-40-10	61%	-0,01%	99,4%	23,8%	23,9%
Argiloso Laterítico	100-0-0	20%	0,15%	99,0%	15,3%	15,1%
	95-0-5	90%	0,00%	100,2%	16,1%	15,8%
	90-0-10	85%	0,00%	101,1%	17,2%	17,0%
	60-40-0	4,4%	0,87%	100,3%	21,1%	21,3%
	55-40-5	48%	0,10%	99,7%	25,3%	25,4%
	50-40-10	88%	0,02%	101,2%	26,2%	26,3%

Tabela A2 – CBR das misturas de 50% de solo, 40% de resíduo e 10% de cal aos 14 e 28 dias de cura.

Tipo de solo	Tempo de cura (dias)	CBR (%)	Expansão (%)	Grau de compactação (%)	w_o (%)	w_m (%)
Arenoso Laterítico	14	150	0	100,4	23,9%	23,9%
	28	202	0	101,4	23,9%	23,6%
Argiloso Laterítico	14	136	0	100,8	26,3%	26,56%
	28	150	0	102	26,3%	26,48%

Tabela A3 – Resistência à compressão simples das misturas de solo arenoso laterítico, resíduo e cal aos 7 dias de cura.

		Mistura		%solo arenoso laterítico-%resíduo-%cal						Constante do anel				23,18	
		Lei- tura	Carga [kgf]	ϕ_1 [cm]	ϕ_2 [cm]	ϕ_3 [cm]	ϕ_m [cm]	h [cm]	Area [cm ²]	RCS [kPa]	RCSm [kPa]	ω_o [%]	ω_m [%]		
100-00-00	1	2,3	53,31	5,2	5,14	5,18	5,17	10,16	20,99	249					
	2	2,2	51,00	5,17	5,16	5,14	5,16	10,16	20,88	239	246	11,10	10,82		
	3	2,3	53,31				5,16	10,16	20,94	250					
95-00-05	1	3,9	90,40	5,16	5,14	5,15	5,15	10,16	20,83	426					
	2	3,6	83,45	5,16	5,14	5,15	5,15	10,16	20,83	393	415	12,50	12,59		
	3	3,9	90,40				5,15	10,16	20,83	426					
90-00-10	1	2,6	60,27	5,15	5,14	5,14	5,14	10,16	20,78	284					
	2	2,7	62,59	5,15	5,13	5,14	5,14	10,16	20,75	296	292	15,10	14,96		
	3	2,7	62,59	5,16	5,14	5,14	5,15	10,16	20,80	295					
60-40-00	1	1,3	30,13	5,2	5,16	5,16	5,17	10,16	21,02	141					
	2	1,3	30,13	5,18	5,16	5,15	5,16	10,16	20,94	141	141	20,00	19,98		
	3	1,3	30,13	5,19	5,14	5,16	5,16	10,16	20,94	141					
55-40-05	1	3,6	83,45	5,17	5,15	5,15	5,16	10,16	20,88	392					
	2	3,5	81,13	5,16	5,14	5,14	5,15	10,16	20,80	382	389	23,20	23,47		
	3	3,6	83,45	5,17	5,14	5,14	5,15	10,16	20,83	393					
50-40-10	1	6,2	143,72	5,16	5,14	5,15	5,15	10,16	20,83	677					
	2	6,6	152,99	5,16	5,14	5,15	5,15	10,16	20,83	720	694	23,80	24,00		
	3	6,3	146,03	5,16	5,15	5,15	5,15	10,16	20,86	687					

Tabela A3 – Resistência à compressão simples das misturas de 50% de solo arenoso laterítico, 40% de resíduo e 10% de cal aos 3 e 28 dias de cura.

		Mistura		Solo argiloso laterítico, resíduo e cal					Constante do anel				23,18
		Lei- tura	Carga [kgf]	ϕ_1 [cm]	ϕ_2 [cm]	ϕ_3 [cm]	ϕ_m [cm]	h [cm]	Area [cm ²]	RCS [kPa]	RCSm [kPa]	ω_o [%]	ω_m [%]
3 dias	1	4,9	113,6	5,18	5,14	5,16	5,16	10,16	20,91	532,6			
	2	4,9	113,6	5,16	5,16	5,14	5,15	10,16	20,86	534	532	23,8	23,85
	3	4,9	113,6	5,19	5,18	5,14	5,17	10,16	20,99	530,6			
28 dias	1	13,3	308,3	5,16	5,16	5,16	5,16	10,16	20,91	1446			
	2	13,3	308,3	5,16	5,16	5,16	5,16	10,16	20,91	1446	1446	23,8	23,85
	3	13,3	308,3					10,16	20,91	1391			

Tabela A5 – Resistência à compressão simples das misturas de solo argiloso laterítico, resíduo e cal aos 7 dias de cura.

		Mistura			%solo arenoso laterítico-%resíduo-%cal					Constante do anel			23,18	
		Lei- tura	Carga [kgf]	ϕ_1 [cm]	ϕ_2 [cm]	ϕ_3 [cm]	ϕ_m [cm]	h [cm]	Area [cm ²]	RCS [kPa]	RCSm [kPa]	ω_o [%]	ω_m [%]	
100-00-00	1	2,7	62,59	5,15	5,13	5,13	5,14	10,16	20,72	296				
	2	2,6	60,27	5,16	5,14	5,14	5,15	10,16	20,80	284	288	15,30	15,04	
	3	2,6	60,27	5,14	5,14	5,14	5,14	10,16	20,75	285				
95-00-05	1	7,1	164,58	5,2	5,14	5,14	5,16	10,16	20,91	772				
	2	7	162,26	5,2	5,14	5,13	5,16	10,16	20,88	762	761	16,00	15,95	
	3	6,9	159,94	5,2	5,14	5,14	5,16	10,16	20,91	750				
90-00-10	1	6,6	152,99	5,2	5,14	5,17	5,17	10,16	20,99	715				
	2	6,4	148,35				5,16	10,16	20,93	695	706	17,20	17,38	
	3	6,5	150,67	5,15	5,16	5,15	5,15	10,16	20,86	708				
60-40-00	1	1,6	37,09	5,2	5,17	5,16	5,18	10,16	21,05	173				
	2	1,6	37,09	5,2	5,16	5,17	5,18	10,16	21,05	173	173	21,10	21,31	
	3	1,6	37,09	5,22	5,18	5,15	5,18	10,16	21,09	172				
55-40-05	1	3,8	88,08	5,17	5,16	5,15	5,16	10,16	20,91	413				
	2	3,8	88,08	5,16	5,16	5,15	5,16	10,16	20,88	414	413	25,30	25,56	
	3	3,8	88,08	5,17	5,15	5,16	5,16	10,16	20,91	413				
0-40-10	1	7,7	178,49	5,16	5,17	5,15	5,16	10,16	20,91	837				
	2	7,6	176,17	5,14	5,15	5,14	5,14	10,16	20,78	832	836	26,20	26,21	
	3	7,7	178,49	5,16	5,15	5,16	5,16	10,16	20,88	838				

Tabela A6 – Resistência à compressão simples das misturas de 50% de solo argiloso laterítico, 40% de resíduo e 10% de cal aos 3 e 28 dias de cura.

23 dias de cura													
Mistura		Solo argiloso laterítico, resíduo e cal							Constante do anel			23,18	
	Lei- tura	Carga [kgf]	ϕ_1 [cm]	ϕ_2 [cm]	ϕ_3 [cm]	ϕ_m [cm]	h [cm]	Area [cm ²]	RCS [kPa]	RCSm [kPa]	ω_o [%]	ω_m [%]	
3 dias	1	6,5	150,7	5,18	5,17	5,15	5,17	10,16	20,95	705,2			
	2	6,3	146	5,2	5,18	5,16	5,18	10,16	21,07	679,6	687	26,2 26,41	
	3	6,2	143,7	5,15	5,16	5,14	5,15	10,16	20,83	676,6			
28 dias	1	9,6	222,5	5,16	5,16	5,16	5,16	10,16	20,91	1044			
	2	9,6	222,5	5,16	5,16	5,16	5,16	10,16	20,91	1044	1044	26,2 26,41	
	3	9,6	222,5						20,91	1044			

Tabela A7 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas de solo arenoso laterítico, resíduo e cal aos 7 dias de cura.

Mistura		%solo arenoso laterítico-%resíduo-%cal							Constante do anel				23,18
	Lei-tura	Carga [kgf]	ϕ_1 [cm]	ϕ_2 [cm]	ϕ_3 [cm]	ϕ_m [cm]	h [cm]	Area [cm ²]	RCS [kPa]	RCSm [kPa]	ω_o [%]	ω_m [%]	
100-00-00	1	0,4	9,27	5,08	5,04	5,07	5,06	5,07	20,11	68			
	2	0,4	9,27	5,06	5,07	5,09	5,07	5,09	20,15	67	73	11,10	10,82
	3	0,5	11,59	5,07	5,03	5,07	5,05	5,07	20,03	85			
95-00-05	1	0,6	13,91				5,04	5,072	19,95	102			
	2	0,6	13,91				5,04	5,072	19,95	102	108	12,50	12,59
	3	0,7	16,23	5,04	5,04	5,07	5,04	5,072	19,95	119			
90-00-10	1	0,4	9,27				5,04	5,07	19,95	68			
	2	0,5	11,59				5,04	5,07	19,95	85	74	15,10	14,96
	3	0,4	9,27				5,04	5,07	19,95	68			
60-00-40	1	0,2	4,64				5,03	5,055	19,90	34			
	2	0,2	4,64	5	5,04	5,05	5,02	5,05	19,79	34	34	20,00	19,98
	3	0,2	4,64	5,07	5,02	5,06	5,05	5,06	20,01	34			
55-40-05	1	0,9	20,86				5,03	5,05	19,87	154			
	2	0,8	18,54	5,03	5,03	5,05	5,03	5,05	19,87	137	142	23,20	23,47
	3	0,8	18,54				5,03	5,05	19,87	137			
50-40-10	1	2,0	46,36				5,03	5,05	19,87	342			
	2	2,1	48,68				5,03	5,05	19,87	359	348	23,80	24,00
	3	2,0	46,36				5,03	5,05	19,87	342			

Tabela A8 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas de 50% de solo arenoso laterítico, 40% de resíduo e 10% de cal aos 3 e 28 dias de cura.

Mistura		Solo argiloso laterítico, resíduo e cal							Constante do anel				23,18
	Lei-tura	Carga [kgf]	ϕ_1 [cm]	ϕ_2 [cm]	ϕ_3 [cm]	ϕ_m [cm]	h [cm]	Area [cm ²]	RCS [kPa]	RCSm [kPa]	ω_o [%]	ω_m [%]	
3 dias	1	1,4	32,45	5,02	5,06	5,16	5,04	5,155	19,95	233,9			
	2	1,3	30,13	5,04	5,06	5,16	5,05	5,16	20,03	216,6	234	0,238	0,238
	3	1,5	34,77	5	5,06	5,15	5,03	5,15	19,87	251,4			
28 dias	1	4,8	111,3	5,02	5,06	5,16	5,04	5,155	19,95	802,1			
	2	4,5	104,3	5,04	5,06	5,16	5,05	5,16	20,03	749,7	802	0,238	0,238
	3	5,1	118,2	5	5,06	5,15	5,03	5,15	19,87	854,7			

Tabela A9 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas de solo argiloso laterítico, resíduo e cal aos 7 dias de cura.

		Mistura		%solo arenoso laterítico-%resíduo-%cal					Constante do anel			23,18	
		Lei- tura	Carga [kgf]	ϕ_1 [cm]	ϕ_2 [cm]	ϕ_3 [cm]	ϕ_m [cm]	h [cm]	Area [cm ²]	RCS [kPa]	RCSm [kPa]	ω_o [%]	ω_m [%]
100-00-00	1	0,6	13,91	5,05	5,03	5,04	5,04	5,04	19,95	103			
	2	0,5	11,59	5,03	5,03	5,05	5,03	5,05	19,87	85	91	15,30	15,04
	3	0,5	11,59	5,03	5	5,03	5,02	5,03	19,75	86			
95-00-05	1	1,4	32,45				5,03	5,07	19,85	238			
	2	1,3	30,13	5	5,04	5,08	5,02	5,08	19,79	221	227	16,00	15,95
	3	1,3	30,13	5,02	5,05	5,06	5,04	5,06	19,91	222			
90-00-10	1	1,3	30,13				5,04	5,07	19,95	221			
	2	1,2	27,82				5,04	5,07	19,95	204	215	17,20	17,38
	3	1,3	30,13				5,04	5,07	19,95	221			
60-40-00	1	0,3	6,95	4,99	5,04	5,04	5,02	5,04	19,75	52			
	2	0,3	6,95	5	5,04	5,12	5,02	5,12	19,79	51	51	21,10	21,31
	3	0,3	6,95	5,04	5,03	5,04	5,04	5,04	19,91	51			
55-40-05	1	1	23,18				5,04	5,04	19,95	171			
	2	0,9	20,86				5,04	5,04	19,95	154	160	25,30	25,56
	3	0,9	20,86				5,04	5,04	19,95	154			
50-40-10	1	2,6	60,27				5,04	5,04	19,95	444			
	2	2,6	60,27				5,04	5,04	19,95	444	444	26,20	26,21
	3	2,6	60,27				5,04	5,04	19,95	444			

Tabela A10 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas de 50% de solo argiloso laterítico, 40% de resíduo e 10% de cal aos 3 e 28 dias de cura.

100% de carvão e 0% de cal													
Mistura			Solo argiloso laterítico, resíduo e cal						Constante do anel				23,18
	Lei- tura	Carga [kgf]	ϕ_1 [cm]	ϕ_2 [cm]	ϕ_3 [cm]	ϕ_m [cm]	h [cm]	Area [cm ²]	RCS [kPa]	RCSm [kPa]	ω_o [%]	ω_m [%]	
3 dias	1	1,8	41,72	5,01	5,06	5,15	5,04	5,15	19,91	301,4			
	2	2	46,36	5,01	5,06	5,15	5,03	5,15	19,89	335	335	0,262	0,264
	3	2,2	51	5	5,06	5,15	5,03	5,15	19,87	368,7			
28 dias	1	3	69,54	5,01	5,06	5,15	5,04	5,15	19,91	502,3			
	2	2,9	67,22	5,01	5,06	5,15	5,03	5,15	19,89	485,8	491	0,262	0,264
	3	2,9	67,22	5	5,06	5,15	5,03	5,15	19,87	486			

- ANEXO B -

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE GRUBBS PARA
DETECÇÃO DE *OUTLIERS***

Tabela B1 – Identificação de *outliers* do ensaio de resistência à compressão simples.

Solo	Cura (dias)	Cal (%)	Res (%)	Corpo de prova			média	desvio padrão	G maior	G menor	G _{crítico} 95%	Y máx	Y mín	Média adotada
				1	2	3								
LA'	7	0	0	239	249	250	246	6,08	1,151	0,658	1,15	253,0	239,0	250
LA'	7	5	0	393	426	426	415	19,05	1,155	0,577	1,15	436,9	393,1	426
LA'	7	10	0	284	295	296	292	6,66	1,151	0,651	1,15	299,3	284,0	296
LA'	7	0	40	141	141	141	141	0,00			1,15	141,0	141,0	141
LA'	7	5	40	382	392	393	389	6,08	1,151	0,658	1,15	396,0	382,0	393
LA'	7	10	40	677	687	720	695	22,50	0,785	1,126	1,15	720,5	668,8	695
LG'	7	0	0	284	285	296	288	6,66	0,651	1,151	1,15	296,0	280,7	285
LG'	7	5	0	750	762	772	761	11,02	1,029	0,968	1,15	774,0	748,7	761
LG'	7	10	0	695	708	715	706	10,15	1,084	0,887	1,15	717,7	694,3	706
LG'	7	0	40	172	173	173	173	0,58	1,155	0,577	1,15	173,3	172,0	173
LG'	7	5	40	413	413	414	413	0,58	0,577	1,155	1,15	414,0	412,7	413
LG'	7	10	40	832	837	838	836	3,21	1,141	0,726	1,15	839,4	832,0	836
LA'	3	10	40	531	533	534	533	1,53	1,091	0,873	1,15	534,4	530,9	533
LA'	28	10	40	1446	1446	1446	1446	0,00			1,15	1446,0	1446,0	1446
LG'	3	10	40	677	680	705	687	15,37	0,672	1,149	1,15	705,0	669,7	687
LG'	28	10	40	1044	1044	1044	1044	0,00			1,15	1044,0	1044,0	1044

Tabela B2 – Identificação de *outliers* do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Solo	Cura [dias]	Cal [%]	Res [%]	Corpo de prova			média	desvio padrão	G maior	G menor	G _{crítico} 95%	Y máximo	Y mínimo	Média adotada
				1	2	3								
LA'	7	0	0	67	68	85	73	10,12	0,626	1,153	1,15	85,0	61,7	67,5
LA'	7	5	0	102	102	119	108	9,81	0,577	1,155	1,15	119,0	96,4	102,0
LA'	7	10	0	68	68	85	74	9,81	0,577	1,155	1,15	85,0	62,4	68,0
LA'	7	0	40	34	34	34	34	0,00			1,15	34,0	34,0	34,0
LA'	7	5	40	137	137	154	143	9,81	0,577	1,155	1,15	154,0	131,4	137,0
LA'	7	10	40	342	342	359	348	9,81	0,577	1,155	1,15	359,0	336,4	342,0
LG'	7	0	0	85	86	103	91	10,12	0,626	1,153	1,15	103,0	79,7	85,5
LG'	7	5	0	221	222	238	227	9,54	0,629	1,153	1,15	238,0	216,0	221,5
LG'	7	10	0	204	221	221	215	9,81	1,155	0,577	1,15	226,6	204,0	221,0
LG'	7	0	40	51	51	52	51	0,58	0,577	1,155	1,15	52,0	50,7	51,0
LG'	7	5	40	154	154	171	160	9,81	0,577	1,155	1,15	171,0	148,4	154,0
LG'	7	10	40	444	444	444	444	0,00			1,15	444,0	444,0	444,0
LA'	3	10	40	217	234	251	234	17,00	1,000	1,000	1,15	253,6	214,5	234,0
LA'	28	10	40	750	802	855	802	52,50	0,997	1,003	1,15	862,7	742,0	802,3
LG'	3	10	40	301	335	369	335	34,00	1,000	1,000	1,15	374,1	295,9	335,0
LG'	28	10	40	486	486	502	491	9,24	0,577	1,155	1,15	502,0	480,7	486,0

- ANEXO C -
ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Experimento fatorial para o ensaio de resistência à compressão simples para 7 dias de cura.

Fatores

		Níveis	Descrição	Repetições r =	3
A	Tipo de solo	2	0 LA'		
			1 LG'		
B	Teor de resíduo	2	0 0%		
			1 40%		
C	Teor de cal	3	0 0%		
			1 5%		
			2 10%		
		m =	12		

Cond. Exp.	A Tipo de solo	B Teor de resíduo	C Teor de cal	RCS			Totais parciais T _(c)	T _(c) /r	$\sum_{k=1}^r Y_K^2$
				Repetição					
				Y ₁	Y ₂	Y ₃			
1	0	0	0	296	284	285	865	288	249.497
2	1	0	0	249	239	250	738	246	181.622
3	0	1	0	173	173	172	518	173	89.442
4	1	1	0	141	141	141	423	141	59.643
5	0	0	1	772	762	750	2.284	761	1.739.128
6	1	0	1	426	393	426	1.245	415	517.401
7	0	1	1	413	414	413	1.240	413	512.534
8	1	1	1	392	382	393	1.167	389	454.037
9	0	0	2	715	695	708	2.118	706	1.495.514
10	1	0	2	284	296	295	875	292	255.297
11	0	1	2	837	832	838	2.507	836	2.095.037
12	1	1	2	697	720	687	2.104	701	1.476.178

Total 16.084 5.361 9.125.330

$$\bar{Y} = 16,78$$

$$C = \frac{T^2}{N} = 7.185.974$$

$$SQ_{total} = \sum_{c=1}^m \sum_{k=1}^r Y_{ck}^2 - \frac{T^2}{N} = 1.939.356,22$$

	A ₀	A ₁	
B ₀	5.267	2.858	8.125
B ₁	4.265	3.694	7.959
	9.532	6.552	16.084

encoberta

	A ₀	A ₁	
C ₀	1.383	1.161	2.544
C ₁	3.524	2.412	5.936
C ₂	4.625	2.979	7.604
	9.532	6.552	16.084

	B ₀	B ₁	
C ₀	1.603	941	2.544
C ₁	3.529	2.407	5.936
C ₂	2.993	4.611	7.604
	8.125	7.959	16.084

Soma de quadrados

A e B	341.283	A e C	1.441.026	B e C	1.467.685
A	246.678	A	246.678	B	765
B	765	C	1.108.097	C	1.108.097
AB	93.840	AC	86.251	BC	358.822

Análise do planejamento fatorial completo com três fatores

Fonte de Var.	Graus de lib. (GL)	Soma de quad. (SQ)	Quad médio QM=SQ/GL	F ₀	F _{0,05}	F _{0,01}	significante?	
							F ₀ >F _{0,05}	F ₀ >F _{0,01}
A	1	246.678	246.678	142,83	4,13	7,44	sim	sim
B	1	765	765	0,44	4,13	7,44	não	não
C	2	1.108.097	554.048	320,81	3,28	5,29	sim	sim
AB	1	93.840	93.840	54,34	4,13	7,44	sim	sim
AC	2	86.251	43.125	24,97	3,28	5,29	sim	sim
BC	2	358.822	179.411	103,88	3,28	5,29	sim	sim
Erro	26	44.903	1.727					
Total	35	1.939.356	55.410					

Experimento fatorial para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral para 7 dias de cura.

Fatores

		Níveis	Descrição	Repetições r =	3
A	Tipo de solo	2	0 LA' 1 LG'		
B	Teor de resíduo	2	0 0% 1 40%		
C	Teor de cal	3	0 0% 1 5% 2 10%		

$$m = 12$$

Cond. Exp.	A Tipo de solo	B Teor de resíduo	C Teor de cal	Comp. Diametral			Totais parciais	T _(c) /r	$\sum_{k=1}^r Y_K^2$
				Repetição					
				Y ₁	Y ₂	Y ₃	T _(c)		
1	0	0	0	68	67	85	220	73	16.338
2	1	0	0	103	85	86	274	91	25.230
3	0	1	0	34	34	34	102	34	3.468
4	1	1	0	52	51	51	154	51	7.906
5	0	0	1	102	102	119	323	108	34.969
6	1	0	1	238	221	222	681	227	154.769
7	0	1	1	154	137	137	428	143	61.254
8	1	1	1	171	154	154	479	160	76.673
9	0	0	2	68	85	68	221	74	16.473
10	1	0	2	221	204	221	646	215	139.298
11	0	1	2	342	359	342	1.043	348	362.809
12	1	1	2	444	444	444	1.332	444	591.408
Total							5.903	1.968	1.490.595

$$\bar{Y} = 3,97$$

$$C = \frac{T^2}{N} = 967.928$$

$$SQ_{total} = \sum_{c=1}^m \sum_{k=1}^r Y_{ck}^2 - \frac{T^2}{N} = 522.666,97$$

	A ₀	A ₁	
B ₀	764	1.601	2.365
B ₁	1.573	1.965	3.538
	2.337	3.566	5.903

	A ₀	A ₁	
C ₀	322	428	750
C ₁	751	1.160	1.911
C ₂	1.264	1.978	3.242
	2.337	3.566	5.903

	B ₀	B ₁	
C ₀	494	256	750
C ₁	1.004	907	1.911
C ₂	867	2.375	3.242
	2.365	3.538	5.903

Soma de quadrados

A e B	85.678	A e C	316.513	B e C	454.164
A	41.957	A	41.957	B	38.220
B	38.220	C	259.154	C	259.154
AB	5.501	AC	15.403	BC	156.790

Análise do planejamento fatorial completo com três fatores

Fonte de Var.	Graus de lib. (GL)	Soma de quad. (SQ)	Quad médio QM=SQ/GL	F ₀	F _{0,05}	F _{0,01}	significante?	
							F ₀ >F _{0,05}	F ₀ >F _{0,01}
A	1	41.957	41.957	193,31	4,13	7,44	sim	sim
B	1	38.220	38.220	176,10	4,13	7,44	sim	sim
C	2	259.154	129.577	597,02	3,28	5,29	sim	sim
AB	1	5.501	5.501	25,34	4,13	7,44	sim	sim
AC	2	15.403	7.701	35,48	3,28	5,29	sim	sim
BC	2	156.790	78.395	361,20	3,28	5,29	sim	sim
Erro	26	5.643	217					
Total	35	522.667	14.933					

Experimento fatorial para o ensaio de índice de suporte Califórnia para 7 dias de cura.

Fatores

		Níveis	Descrição	Repetições r =	1
A	Tipo de solo	2	0 LA'		
			1 LG'		
B	Teor de resíduo	2	0 0%		
			1 40%		
C	Teor de cal	3	0 0%		
			1 5%		
			2 10%		

$$m = 12$$

Cond. Exp.	A Tipo de solo	B Teor de resíduo	C Teor de cal	CBR			Totais parciais T _(c)	T _(c) /r	$\sum_{k=1}^r Y_K^2$
				Repetição					
				Y ₁	Y ₂	Y ₃			
1	0	0	0	25			25	25	625
2	1	0	0	20			20	20	400
3	0	1	0	9			9	9	81
4	1	1	0	4			4	4	19
5	0	0	1	86			86	86	7.396
6	1	0	1	90			90	90	8.100
7	0	1	1	37			37	37	1.369
8	1	1	1	48			48	48	2.304
9	0	0	2	63			63	63	3.969
10	1	0	2	85			85	85	7.225
11	0	1	2	61			61	61	3.721
12	1	1	2	88			88	88	7.744
Total							616	616	42.953

$$\bar{Y} = ,37$$

$$C = \frac{T^2}{N} = 31.662$$

$$SQ_{total} = \sum_{c=1}^m \sum_{k=1}^r Y_{ck}^2 - \frac{T^2}{N} = 11.290,95$$

	A ₀	A ₁	
B ₀	174	195	369
B ₁	107	140	247
	281	335	616

	A ₀	A ₁	
C ₀	34	24	58
C ₁	123	138	261
C ₂	124	173	297
	281	335	616

	B ₀	B ₁	
C ₀	45	13	58
C ₁	176	85	261
C ₂	148	149	297
	369	247	616

Soma de quadrados

A e B	1.492	A e C	8.952	B e C	10.593
A	247	A	247	B	1.232
B	1.232	C	8.273	C	8.273
AB	13	AC	433	BC	1.088

Análise do planejamento fatorial completo com três fatores

Fonte de Var.	Graus de lib. (GL)	Soma de quad. (SQ)	Quad médio QM=SQ/GL	F ₀	F _{0,05}	F _{0,01}	significante?	
							F ₀ >F _{0,05}	F ₀ >F _{0,01}
A	1	247	247	86,13	4,84	9,65	sim	sim
B	1	1.232	1.232	430,34	4,84	9,65	sim	sim
C	2	8.273	4.136	1.444,60	3,98	7,21	sim	sim
AB	1	13	13	4,47	4,84	9,65	não	não
AC	2	433	216	75,60	3,98	7,21	sim	sim
BC	2	1.088	544	189,98	3,98	7,21	sim	sim
Erro	2	6	3					
Total	11	11.291	1.026					

Experimento fatorial para o ensaio de resistência à compressão simples para 3,7 e 28 dias de cura.

Fatores

		Níveis	Descrição	Rep. r =
A	Tipo de solo	2	0 LA' 1 LG'	3
B	Tempo de cura	3	0 3 1 7 2 28	
		m =	6	

Cond. Exp.	A Tipo de solo	C Tempo de cura	Compressão simples			Totais parciais T _(c)	T _(c) /r	$\sum_{k=1}^r Y_k^2$
			Repetição					
			Y ₁	Y ₂	Y ₃			
1	0	0	533	534	531	1.598	533	851.206
2	1	0	705	680	677	2.062	687	1.417.754
3	0	1	677	720	687	2.084	695	1.448.698
4	1	1	837	832	838	2.507	836	2.095.037
5	0	2	1.446	1.446	1.446	4.338	1.446	6.272.748
6	1	2	1.044	1.044	946	3.034	1.011	3.074.788
Total						15.623	5.208	15.160.231

$$\bar{Y} = 867,94$$

$$C = \frac{T^2}{N} = 13.559.896$$

$$SQ_{total} = \sum_{c=1}^m \sum_{k=1}^r Y_{ck}^2 - \frac{T^2}{N} = 1.600.335$$

	A ₀	A ₁		Soma de quadrados
B ₀	1.598	2.062	3.660	A e B 1.592.422
B ₁	2.084	2.507	4.591	A 9.661
B ₂	4.338	3.034	7.372	B 1.243.315
	8.020	7.603	15.623	AB 339.446

Análise do planejamento fatorial completo com dois fatores

Fonte de Var.	Graus de lib. (GL)	Soma de quad. (SQ)	Quad médio SQ/GL	F ₀	F _{0,05}	F _{0,01}	significante?	
							F ₀ >F _{0,05}	F ₀ >F _{0,01}
A	1	9.661	9.661	15	4,75	8,40	sim	sim
B	2	1.243.315	621.657	943	3,59	6,11	sim	sim
AB	2	339.446	169.723	257	3,59	6,11	sim	sim
Erro	12	7.913	659					
Total	17	1.600.335	94.137					

Experimento fatorial para o ensaio de resistência tração por compressão diametral para 3,7 e 28 dias de cura.

Fatores

		Níveis	Descrição		Rep. r =	3
A	Tipo de solo	2	0	LA'		
			1	LG'		
B	Tempo de cura	3	0	3		
			1	7		
			2	28		
m =		<hr/> 6				

Cond. Exp.	A Tipo de solo	C Tempo de cura	Compressão simples			Totais parciais T _(c)	T _(c) /r	$\sum_{k=1}^r Y_K^2$
			Repetição					
			Y ₁	Y ₂	Y ₃			
1	0	0	234	217	251	702	234	164.846
2	1	0	301	335	369	1.005	335	338.987
3	0	1	342	359	342	1.043	348	362.809
4	1	1	444	444	444	1.332	444	591.408
5	0	2	802	750	855	2.407	802	1.936.729
6	1	2	502	486	486	1.474	491	724.396
Total						7.963	2.654	4.119.175

$$\bar{Y} = 442,39$$

$$C = \frac{T^2}{N} = 3.522.743 \quad SQ_{total} = \sum_{c=1}^m \sum_{k=1}^r Y_{ck}^2 - \frac{T^2}{N} = 596.432$$

	A ₀	A ₁	Soma de quadrados	
B ₀	702	1.005	1.707	A e B 587.666
B ₁	1.043	1.332	2.375	A 6.460
B ₂	2.407	1.474	3.881	B 413.363
	4.152	3.811	7.963	AB 167.843

Análise do planejamento fatorial completo com dois fatores

Fonte de Var.	Graus de lib. (GL)	Soma de quad. (SQ)	Quad médio SQ/GL	F ₀	F _{0,05}	F _{0,01}	significante?	
							F ₀ >F _{0,05}	F ₀ >F _{0,01}
A	1	6.460	6.460	9	4,75	8,40	sim	sim
B	2	413.363	206.682	283	3,59	6,11	sim	sim
AB	2	167.843	83.922	115	3,59	6,11	sim	sim
Erro	12	8.766	731					
Total	17	596.432	35.084					

- ANEXO D -

**ENSAIOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS
NORMA: NBR 10004 - RESÍDUOS SÓLIDOS
RESÍDUO: LAMA DE CALCÁRIO E DREGS**

ENSAIOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS NORMA: NBR 10004 - RESÍDUOS SÓLIDOS (CLASSIFICAÇÃO)

D1. OBJETIVO

Execução dos testes de Lixiviação, Solubilização e dosagens sobre a Massa Bruta na amostra "**LAMA DE CALCÁRIO E DREGS**" segundo a Norma NBR 10004 Resíduos Sólidos (Classificação).

D.2 METODOLOGIAS ANALÍTICAS

D.2.1 Amostragem

A amostra recebida no laboratório (massa em torno de 3,825kg), foi homogeneizada. A partir deste pré tratamento, foram retiradas as alíquotas para a realização dos ensaios descritos a seguir neste relatório. A amostra analisada foi: "**LAMA DE CALCÁRIO E DREGS**".

D.2.2 Preparação da Amostra

D.2.2.1 Ensaio de Lixiviação

O teste de Lixiviação foi aplicado de acordo com o descrito na NBR 10005 de Setembro/1987.

Primeiramente, verifica-se o teor de sólidos não filtráveis da amostra para que esta seja preparada por um dos três casos abaixo:

Caso 1: Amostras Sólidas: O extrato de lixiviado é montado mantendo-se a proporção de 100 g da amostra na base úmida, para 1600 g de água ultrapurificada. O pH da mistura é medido e se for superior a 5,2 é ajustado em $5,0 \pm 0,2$ através da adição de solução de Ácido Acético 0,5 mol/L. A mistura é colocada sob agitação. Em períodos adequados o Ph do meio é monitorado, de forma a mantê-lo em 5,0 se necessário com a solução de Ácido Acético. A agitação é encerrada após 24 horas.

O volume de solução de Ácido Acético 0,5 mol/L gasto é anotado e o volume final da fração líquida é completado com água ultrapurificada o suficiente para 2000mL de solução. A solução resultante é filtrada em filtro de porosidade 0,45 μ m para em seguida ser submetida às determinações químicas.

Caso 2: Amostras Líquidas com Teor de Sólidos Não-Filtráveis inferior à 0,5%: O extrato para análise é obtido através da filtração da amostra em filtro de porosidade 0,45 μ m na qual a fase sólida é descartada.

Caso 3: Amostras Líquidas com Teor de Sólidos Não-Filtráveis superior à 0,5%: Primeiramente filtra-se a amostra em filtro de porosidade 0,45 μm até obtenção de uma massa de Sólidos Não-Filtráveis, a fração líquida obtida é quantificada e acondicionada para ser adicionada ao extrato do lixiviado dos Sólidos Não-Filtráveis. A porção de Sólidos Não-Filtráveis é submetida a extração como no Caso 1.

A amostra analisada pertence ao Caso 1.

D.2.2.2 Dados obtidos na preparação do Lixiviado:

Parâmetros	Valores
Teor de Sólidos Não-Filtráveis (%)	100
Massa de Amostra Utilizada (g)	25,00
Fração Filtrável (mL)	0
Fração Não-Filtrável (g)	25,00
pH inicial	11,00
pH final	5,00
Volume de Ácido Acético 0,5 mol/L utilizado (mL)	25
Volume de Extrato do Lixiviado (mL)	500
Volume Total do Lixiviado (mL)	500

D.2.2.3 Ensaio de Solubilização

O ensaio de Solubilização foi realizado conforme descrito na NBR 10006, sendo aplicado somente para resíduos no estado físico sólido.

Empregou-se a proporção de 125 g de amostra na base seca, devidamente homogeneizada, para 500 mL de água ultrapurificada. Agitou-se a amostra por cinco minutos e o pH foi medido. A suspensão foi deixada em repouso por 7 dias. Ao final deste tempo a solução resultante foi filtrada em filtro de porosidade de 0,45 μm e o filtrado resultante foi submetido às determinações químicas.

D.2.2.4 Ensaio Sobre a Amostra Bruta

Para a determinação dos elementos metálicos, uma massa de cerca de 5 g de amostra previamente homogeneizada foi digerida por meio de ácido clorídrico/nítrico. A solução obtida foi diluída com água ultrapurificada até o volume de 100 mL.

Para o caso da dosagem dos cianeto, uma massa de 10g foi submetida a tratamento por ácido sulfúrico, procedendo-se a destilação do mesmo, seguido de absorção em solução de hidróxido de sódio.

D.3 RESULTADOS ANALÍTICOS “LAMA DE CALCÁRIO E DREGS”

Parâmetros químicos no Lixiviado, Solubilizado e Massa Bruta

Parâmetros	Lixiviado		Solubilizado		Massa Bruta	
	Resultado (mg/L)	Valor (*) Listagem 7 (mg/L)	Resultado (mg/L)	Valor (*) Listagem 8 (mg/L)	Resultado (mg/L)	Valor (*) Listagem 9 e 10 (mg/L)
Alumínio	-	-	<LQ	0,2	-	-
Arsênio	<LQ	5,0	<LQ	0,05	<LQ	1000
Bário	0,28	100	<LQ	1,0	-	-
Berílio	-	-	-	-	<LQ	100
Cádmio	<LQ	0,5	<LQ	0,005	-	-
Chumbo	<LQ	5,0	<LQ	0,05	0,9	1000
Cianeto	-	-	1,47	0,1	5,88	1000
Cloreto	-	-	111,8	250	-	-
Cobre	-	-	<LQ	1,0	-	-
Cromo total	<LQ	5,0	<LQ	0,05	-	-
Cromo VI	-	-	-	-	<LQ	100
Dureza (em CaCO ₃)	-	-	10,3	500	-	-
Ferro	-	-	<LQ	0,3	-	-
Fluoreto	<LQ	150	1,24	1,5	-	-
Índice de Fenóis	-	-	<LQ	0,001	<LQ	10
Manganês	-	-	<LQ	0,1	-	-
Mercúrio	<LQ	0,1	<LQ	0,001	<LQ	100
Nitrato	-	-	10,8	10	-	-
Prata	<LQ	5,0	<LQ	0,05	-	-
Selênio	<LQ	1,0	<LQ	0,01	<LQ	100
Sódio	-	-	1253,4	200	-	-
Sulfato	-	-	47,2	400	-	-
Surfactantes	-	-	<LQ	0,2	-	-
Vanádio	-	-	-	-	6,5	1000
Zinco	-	-	<LQ	5,0	-	-

Parâmetros	Solubilizado	Amostra Bruta	Amostra Bruta Valor (*) List 9 e 10
pH	12,6	11,0	2-12,5
Umidade (% p/p)	-	26	-
Hidrocarbonetos (% p/p)	-	0,1	5,0

LQ = Limite de quantificação

(*) = Valores indicados nos anexos G, H, I E J da NBR 100004.

D.4 CONCLUSÃO

D.4.1 Ensaio de Lixiviado:

Os parâmetros analisados apresentaram concentrações inferiores às indicadas na Listagem 7 da NBR 10004;

D.4.2 Ensaio de Solubilizado:

Os parâmetros Sódio, Cianeto e Nitrato analisados apresentaram concentrações superiores às indicadas na Listagem 8 da NBR 10004;

D.4.3 Ensaio de Massa Bruta:

Os parâmetros analisados apresentaram concentrações inferiores às indicadas nas Listagens 9 e 10 da NBR 10004;

À partir dos resultados dos parâmetros analisados na amostra ***“LAMA DE CALCÁRIO E DREGS”*** esta é classificada da seguinte maneira:

Resíduo de Classe II (Resíduo Não Inerte).