

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**A UTILIZAÇÃO DE MISTURAS SOLO/CINZA PESADA NA
PAVIMENTAÇÃO - ANÁLISE DE ASPECTOS DE
COMPORTAMENTO MECÂNICO E AMBIENTAL**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA CIVIL

EDNEY RODRIGUES DE FARIAS

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 2005.

A UTILIZAÇÃO DE MISTURAS SOLO/CINZA PESADA NA PAVIMENTAÇÃO - ANÁLISE DE ASPECTOS DE COMPORTAMENTO MECÂNICO E AMBIENTAL

Essa dissertação foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA Especialidade ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Civil – PPGEC/UFSC.

Prof. Dr. Glicério Trichês (Orientador)

Prof^a. PhD. Henriette Lebre La Rovere (Coordenadora do PPGEC)

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Augusto P. Ceratti (UFRGS)

Prof. PhD. Marciano Maccarini (UFSC)

Prof. Dr. Antônio Fortunato Marcon (UFSC)

Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Junior (UFSC)

A meus Pais e minha família, Milena e Paulinha.

Edney Rodrigues de Farias

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus Pais pelo esforço, que ainda hoje se faz presente, na criação de condições ideais para que eu pudesse correr atrás de meus sonhos.

A minha esposa, Milena, pelas palavras otimistas que muitas vezes me abasteceram de esperança diante das adversidades.

A minha filha, Paula, que sem dúvida transformou minha vida e transformou-se na principal motivação.

Ao amigo Antônio Odilon Macedo, Mestre.

Ao Professor Glicério Trichês pela oportunidade de participar do projeto, pela orientação, pelos ensinamentos transmitidos e, principalmente, pela compreensão e paciência diante de minhas condições para realizar o projeto.

A todos os funcionários e estagiários do Laboratório de Mecânica dos Solos e os acadêmicos de Engenharia Civil que diretamente trabalharam na consolidação dessa pesquisa, em especial, para o Professor Macarini, Lourenço e Philipi.

Ao Laboratório de Química em especial ao Doutorando Emerson Schultz, pela orientação nos aspectos relacionados à química na pesquisa.

Ao Laboratório de Saneamento da Escola Técnica Federal de Santa Catarina, em especial ao Técnico Djan Freitas, que muitas vezes recebeu as amostras para análise nos fins de semana e feriados.

A PROSUL, empresa que sinto orgulho de participar do corpo técnico.

A TRACTEBEL, pelo investimento em uma idéia inovadora e que, sem dúvida, está direcionada à busca do desenvolvimento sustentável.

Aos meus irmãos e familiares Paulo, Mônica, Gustavo, Eduardo e Simone.

Aos meus amigos e colegas que durante a elaboração desse trabalho me "aturaram" "enchendo seus ouvidos" com assuntos que, muitas vezes, não os interessavam, Adriano, Clara, Débora, Edmir, Fernando, Gerson, Rafael (Alemão), Rodrigo (Negão), Rosana, Gerson, Mirane, Sibebe, Silvano, Soraia, Márcio e Maicon.

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados da avaliação do comportamento geotécnico e das interações ambientais da estabilização de solos do Município de Tubarão (SC) com cinza pesada da termelétrica Jorge Lacerda visando o seu emprego em camadas de estruturas de pavimentos. Com relação aos aspectos mecânicos, tanto o solo como a cinza foram caracterizados e ensaiados em laboratório quanto às curvas de compactação, à capacidade de suporte, à resistência à compressão simples e ao comportamento resiliente, isoladamente e misturados. A cinza pesada, por tratar-se de um rejeito da indústria energética, foi classificada de acordo com as normas brasileiras que disciplinam a classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade. Com base em experiências internacionais, e adaptado à situação particular, foi elaborado um ensaio piloto que visa avaliar a periculosidade da utilização de materiais residuais em situações similares àquelas que serão submetidos na estrutura do pavimento. O ensaio piloto consiste na percolação da água da chuva em células contendo diversas misturas de solo e cinza pesada. A partir da percolação de uma solução com características da água da chuva sobre as diversas misturas analisadas, são analisados os elementos potencialmente poluentes presentes no líquido percolado. A percolação é realizada em uma camada de material com espessura e grau de compactação similares àqueles que serão utilizados na estrutura de um pavimento típico de vias urbanas de médio volume de tráfego. Os elementos químicos analisados no efluente percolado foram escolhidos com base na composição química das misturas e foram comparados com os valores orientadores da qualidade do solo e da água subterrânea. Tanto as avaliações do comportamento geotécnico quanto as avaliações ambientais, consideram os materiais de maneira individual, misturados e com a adição de um agente cimentante, ou seja, o solo, a cinza, misturas solo/cinza pesada e misturas solo/cinza pesada/cal em diversas proporções. Os resultados obtidos indicaram que tanto o solo estudado quanto a cinza pesada, quando aplicados individualmente, têm um péssimo comportamento geotécnico, não sendo indicados para camada final de terraplenagem ou reforço de subleito. Porém, quando misturados e estabilizados com cal apresentam um comportamento geotécnico satisfatório, podendo ser aplicados em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis.

A estabilização com cal também é benéfica quanto às interações ambientais, pois os resultados indicaram uma redução nas taxas de lixiviação e solubilização de compostos químicos perigosos presentes na cinza pesada. A partir de uma análise conjunta entre os aspectos mecânicos e de riscos ambientais, são feitas recomendações para a aplicação dos materiais nas camadas do pavimento e também sugestões quanto aos estudos que poderão ser desenvolvidos a partir dos resultados até então obtidos.

Palavras-chaves: **Cinzas pesadas, resíduos sólidos, estabilização, pavimentação.**

ABSTRACT

This work presents the results of the evaluation of the geotechnical behavior and of the environmental interactions of the stabilization of the soils in the city of Tubarão (SC) using the bottom ash from the thermoelectric Jorge Lacerda, considering its use in pavement layers. In relation to the mechanical aspects, the soil and the ash were characterized and sampled in laboratory, considering the compactation curves, the support capacity, resistance to compression and the resilient behavior, in isolation and in mixtures. Because it is waste from the energy industry, the bottom ash was classified according to the Brazilian norms that discipline the hazard classification of solid waste. Based on international experiences and adapted to the particular situation, a pilot sample was elaborated, aiming the hazard evaluation of the use of residual materials in similar situations to those they will be submitted in the structure of pavement. The pilot sample consists of the percolation of rain water in cells containing several mixtures of soil and bottom ash. From the percolation of a solution with characteristics of rain water over the several analyzed mixtures, the potential polluting elements that are present in the percolated liquid are analysed. The percolation is done in a layer of material with the thickness and compactation level in which it will be used in the pavement structure. The chemical elements analysed in the percolated effluents were chosen based on the chemical composition of the mixtures and were compared to the guiding values for soil quality and underground water. The evaluations of geotechnical behavior and the environmental evaluations considered the materials individually, mixed, and added to a cementing agent, that is, soil, ash, soil/ash mixtures and soil/ash/lime in several proportions.

The results indicated that the soil and the bottom ash, when individually applied have a terrible geotechnical behavior, not being indicated for the final layer of earthworks or reinforcement layer. However, when mixed and stabilized with lime they present a satisfactory geotechnical behavior and can be applied in subbases of flexible pavement.

The stabilization with lime also benefits the environment interactions, because the results indicated a reduction in the leaching rates and solubilization of the hazardous chemical compounds present in the bottom ash. From a joint analysis between the mechanical aspects and the environmental risks, recommendations are made for the application of the materials in pavement layers and suggestions are made concerning the studies that might be developed from the results obtained up to now.

Key words: **Bottom Ash, solid wastes, stabilization, pavement.**

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Composição química da cinza pesada (porcentagem em peso).....	página 6
Quadro 2.2 - Composição química da cinza pesada (elementos maiores).....	7
Quadro 2.3 - Locais onde foram aplicadas cinzas com outros materiais na pavimentação	8
Quadro 2.4 - Composições da cinza pesada quanto aos elementos perigosos da NBR 10004/87.....	14
Quadro 3.1 - Misturas solo/cinza estudadas.....	19
Quadro 3.2 - Misturas solo/cinza pesada/cal estudadas.....	20
Quadro 3.3 - Métodos utilizados na determinação da composição química do materiais.....	22
Quadro 3.4 - Métodos utilizados na determinação das concentrações dos elementos lixiviados.....	23
Quadro 3.5 - Métodos de avaliação das concentrações dos elementos solubilizados.....	23
Quadro 3.6 - Características físico-químicas da chuva na região de Tubarão.....	24
Quadro 3.7 - Reagentes utilizados na solução de percolação.....	24
Quadro 3.8 - Métodos de análise química do líquido percolado.....	28
Quadro 4.2 - Classificação MCT das jazidas de solo de Tubarão.....	29
Quadro 4.3- Características físico-químicas da cal hidratada.....	31
Quadro 4.4 - Frações de areia, silte e argila no solo e na cinza.....	31
Quadro 5.1 - Misturas solo/cinza pesada analisadas.....	33
Quadro 5.2 - Resultados dos ensaios geotécnicos das misturas.....	35
Quadro 5.3 - Resultados dos ensaios de pastilha na amostra 100/0.....	36
Quadro 5.4 - Resultados dos ensaios de pastilha na amostra 0/100.....	36
Quadro 5.5 - Resultados dos ensaios de pastilha na amostra 30/70.....	37
Quadro 5.6 - Resultados dos ensaios de pastilha na amostra 50/50.....	37
Quadro 5.7 - Resultados dos ensaios de pastilha na amostra 70/30.....	37
Quadro 5.8 - Teores de cal para a estabilização das misturas solo/cinza pesada.....	37
Quadro 5.9 - Resultados dos ensaios geotécnicos das misturas estabilizadas com cal.....	38
Quadro 5.10 - Resultados dos ensaios de CBR para as diferentes misturas ensaiadas.....	42
Quadro 5.11 - Resistência à compressão simples das misturas ensaiadas.....	47
Quadro 5.12 - Composição químicas das amostras analisadas (elementos perigosos).....	50
Quadro 5.13 - Percentuais em peso dos corpos-de-prova do ensaio de percolação.....	58
Quadro 5.14 - Permeabilidade obtida no ensaio de percolação (amostras com N>6).....	59
Quadro 5.15 - Concentrações de Mercúrio, Chumbo e Arsênio nas amostras.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo de queima do carvão mineral em usinas termelétricas.....	página 6
Figura 3.1 - Variação do pH da solução ao longo do período de ensaio.....	25
Figura 3.2 - Geometria das células de percolação.....	26
Figura 3.3 - Montagem da Célula de Percolação.....	27
Figura 3.4 - Células de percolação e coletores de líquido percolado posicionados.....	28
Figura 4.1 - Perfil da jazida de solo utilizada na pesquisa.....	30
Figura 4.2 - Curvas granulométricas dos materiais.....	32
Figura 5.2 - Variação do CBR das misturas solo/cinza pesada.....	34
Figura 5.3 - Variação da expansibilidade das misturas solo/cinza pesada.....	35
Figura 5.4 - Curvas de compactação das misturas solo/cinza pesada/cal.....	39
Figura 5.5 - Curvas de CBR das misturas solo/cinza pesada/cal (cura de 4 dias).....	39
Figura 5.6 - Curvas de expansão das misturas solo/cinza pesada/cal (cura de 4 dias).....	40
Figura 5.7 - Variação do CBR com a adição de cal para as misturas solo/cinza pesada.....	41
Figura 5.8 - Comportamento resiliente do solo estudado.....	42
Figura 5.9 - Comportamento resiliente da cinza.....	43
Figura 5.10 - Comportamento resiliente da mistura 70/30.....	44
Figura 5.11 - Comportamento Resiliente da mistura solo/cinza pesada/cal (70/30/4).....	44
Figura 5.12 - Comportamento Resiliente da mistura solo/cinza pesada/cal (50/50/3).....	45
Figura 5.13 - Variação da resistência à compressão simples com a idade.....	46
Figura 5.14 - Variação da resistência a compressão das misturas solo/cinza pesada/cal.....	47
Figura 5.15 - Comparação das composições das amostras analisadas e os valores de referência.....	51
Figura 5.16 - Concentrações das substâncias da listagem 9 da NBR 10004 e as concentrações presentes nas amostras analisadas.....	52
Figura 5.17 - Ensaio de lixiviação e os valores de intervenção para qualidade de águas subterrâneas.....	53
Figura 5.18 - Ensaio de lixiviação e os limites da Listagem 7 da NBR 10004.....	53
Figura 5.19 - Ensaio de solubilização e valores de referência para qualidade de águas subterrâneas.....	55
Figura 5.20 - Ensaio de solubilização e os limites da Listagem 8 da NBR 10004.....	56

LISTA DE FIGURAS (Continuação)

Figura 5.21 - Concentrações de Ferro total solubilizadas nas amostras sem cal e com cal.	62
Figura 5.22 - Concentrações de Alumínio solubilizadas nas amostras sem cal e com cal.	63
Figura 5.23 Acidez (CaCO ₃) observada nas amostras sem cal e com cal.	64
Figura 5.24 - pH observado nas amostras sem cal e com cal durante o ensaio.	65
Figura 5.25 - Concentrações solubilizadas de mercúrio, chumbo e arsênio.	66

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivo Geral.....	2
1.3 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Apresentação da Dissertação.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Origem e Características da Cinza Pesada.....	5
2.2 A Utilização de Cinzas na Pavimentação - Experiências Internacionais.....	7
2.3 A Utilização de Cinzas na Pavimentação – Experiência Brasileira.....	10
2.4 Avaliação das Interações Ambientais do Uso de Resíduos na Pavimentação.....	12
2.5 Parâmetros de Qualidade Para o Solo e Para as Águas Subterrâneas.....	14
2.5.1 Valores de qualidade para os solos.....	15
2.5.2 Valores de qualidade para a água subterrânea.....	15
2.6 Classificação da Periculosidade Dos Resíduos Sólidos no Brasil.....	16
3 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	17
3.1 Etapa I - Caracterização dos materiais.....	17
3.1.1 Caracterização do solo.....	17
3.1.2 Caracterização da cinza.....	18
3.2 Etapa II – Caracterização de Misturas Solo/Cinza.....	18
3.2.1 Misturas estudadas.....	18
3.2.2 Ensaio realizados.....	19
3.3 Etapa III – Caracterização das Misturas Solo/Cinza/Cal.....	19
3.3.1 Misturas estudadas.....	19
3.3.2 Avaliação do teor de cal a ser empregado nas misturas solo/cinza pesada....	20
3.3.3 Ensaio realizados.....	20
3.4 Etapa IV – Avaliação das Interações Ambientais.....	20
3.4.1 Determinação da composição química dos materiais.....	21
3.4.2 Ensaio de percolação.....	21
4 MATERIAIS UTILIZADOS.....	29
4.1 Jazida de Solo.....	29
4.2 Jazida de Cinza Pesada.....	30
4.3 A Cal.....	31

4.4	Caracterização Física dos Materiais.....	31
4.4.1	Granulometria.....	31
4.4.2	Limites de Atterberg.....	32
5	RESULTADOS OBTIDOS.....	33
5.1	Avaliações do Comportamento Mecânico.....	33
5.1.1	Avaliação do comportamento mecânico das misturas solo/cinza pesada.....	33
5.1.2	Avaliação do comportamento mecânico das misturas solo/cinza pesada/cal..	35
5.1.3	Avaliação do comportamento resiliente.....	41
5.1.4	Ensaio de resistência à compressão simples.....	45
5.1.5	Discussão dos resultados obtidos para o comportamento mecânico.....	48
5.2	Análise das Interações Ambientais.....	49
5.2.1	Composição química dos materiais.....	50
5.2.2	Classificação quanto à Periculosidade.....	50
5.2.3	Ensaio de lixiviação.....	52
5.2.4	Ensaio de solubilização.....	54
5.2.5	Ensaio de percolação.....	57
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	67
6.1	Conclusões.....	67
6.2	Recomendações.....	70

1 APRESENTAÇÃO

1.1 Introdução

O depósito atual de cinzas pesadas junto à usina termelétrica Jorge Lacerda está estimado em 1.500.000 toneladas e a produção anual é de aproximadamente 300.000 ton. Com perspectivas do crescimento da demanda energética no país, pressupõe-se um aumento na geração de cinzas pesadas ao longo da próxima década.

Diante desse cenário, é responsabilidade de todos os atores envolvidos na atividade de geração de energia elétrica através da queima do carvão mineral, implementar ações que vão ao encontro das proposições da Agenda 21, que estabeleceu diretrizes para as ações locais em busca do desenvolvimento sustentável. Aplicando esse mesmo conceito no desenvolvimento das técnicas de engenharia rodoviária no Estado de Santa Catarina, também é primordial que se pense, cada vez mais, na substituição de materiais virgens por subprodutos ou rejeitos de processos industriais, mesmo que tal substituição não apresente viabilidade econômica.

A demanda por materiais de infra-estrutura viária é grande e cada vez mais se restringem as jazidas de materiais primários (brita, solo, areia, etc). Esse movimento divergente entre a demanda e a oferta de materiais de infra-estrutura, provocará modificações nas avaliações de viabilidade econômica de materiais residuais.

O uso da cinza pesada na construção civil já apresenta avanços significativos e boas perspectivas. Pesquisas conduzidas por POZZOBOM (1997) com cinzas pesadas empregadas como matéria prima na fabricação de artefatos de cimento, substituindo tanto o cimento Portland como o agregado (areia fina e grossa), apresentaram resultados muito promissores.

Entretanto, o emprego da cinza pesada misturada com solo com vistas a obter um material com potencialidade de ser empregado em camadas de pavimentos não tem sido objeto de estudo até então. Em 2001, iniciou-se uma pesquisa no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina, com o objetivo de avaliar o emprego destas misturas na pavimentação viária. Para tanto, foram selecionadas jazidas de solos do município de Tubarão (SC) e, com o solo de uma delas, desenvolveu-se um procedimento investigativo que pudesse fornecer informações técnicas sobre a viabilidade de tal aplicação. Como a cinza pesada é um

resíduo industrial, esse procedimento contemplou metodologias de avaliação do comportamento mecânico e das interações ambientais da cinza pesada, ou da adição da cinza pesada em outras misturas, quando inserida na estrutura do pavimento.

Dessa forma, foi avaliado o comportamento do solo, da cinza pesada, de misturas solo/cinza pesada e misturas solo/cinza pesada/cal.

Foi avaliada a adição da cal nas misturas em virtude da mesma melhorar o comportamento mecânico dos solos para o emprego na pavimentação, como já comprovado em diversos estudos (NARDI, 1975 e MARCON 1977), e na possível redução dos riscos ambientais, uma vez que também já existem trabalhos que comprovam a incorporação de metais presentes na composição de resíduos em matrizes cimentantes (ROCCA et al, 1993, p89.)

Em relação aos aspectos mecânicos, foram realizados ensaios de compactação, CBR com medida da expansão, ensaios de resistência à compressão simples e determinação do comportamento resiliente. Nas avaliações de interação ambiental foram realizados ensaios de caracterização química, lixiviação, solubilização e classificação quanto ao enquadramento como resíduo sólido industrial.

Visando proporcionar condições mais realistas de avaliação ambiental, foi proposto um ensaio, denominado “ensaio de percolação”, onde as amostras são submetidas a percolação de uma solução com características físico químicas semelhantes a da água da chuva da região de Tubarão. A qualidade do líquido percolado no ensaio é então comparada com um valor de referência. Nessa pesquisa, adotou-se, como referência, o padrão de potabilidade do Ministério da Saúde (BAUGARTEM e POZZA, 2001).

1.2 Objetivo Geral

Analisar, a partir de critérios de desempenho mecânico e interações ambientais, a potencialidade do emprego da cinza pesada como material estabilizador de solos na construção rodoviária.

1.3 Objetivos Específicos

- Determinar o potencial de estabilização granulométrica e cimentante do solo com a adição de cinza pesada;

- Determinar o comportamento resiliente de misturas solo/cinza pesada e solo/cinza pesada/cal;
- Determinar a periculosidade da cinza pesada como resíduo industrial, de acordo com as normas brasileiras;
- Avaliar se a mistura da cinza pesada com solo altera suas características de periculosidade; e
- Contribuir para a definição das condições aceitáveis de aplicabilidade da cinza pesada na pavimentação considerando os aspectos mecânicos e ambientais.

1.4 Apresentação da Dissertação

O relatório que apresenta a pesquisa está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Apresentação**

São descritos os aspectos gerais que nortearam os estudos, os objetivos geral e específico da pesquisa e como a pesquisa é apresentada e organizada.

- **Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica**

É apresentada toda a bibliografia consultada relacionada com o uso de cinzas na pavimentação considerando as experiências internacionais e nacionais, padrões de qualidade de solos e águas subterrâneas e classificação de resíduos sólidos.

- **Capítulo 3 – Metodologia**

São descritos os princípios metodológicos que nortearam a realização dos ensaios de laboratório.

- **Capítulo 4 – Materiais Utilizados**

Nesse capítulo são apresentadas as origens do solo, da cinza pesada e da cal utilizados nos ensaios de laboratório. Para o solo são apresentados os parâmetros e justificativas que levaram a definição da jazida da pesquisa.

- **Capítulo 5 – Resultados Obtidos**

Os resultados obtidos nos ensaios de laboratório foram divididos em dois aspectos:

a) Avaliação do Comportamento Mecânico: São apresentados os resultados de caracterização física e mecânica do solo, da cinza e das misturas solo/cinza pesada e solo/cinza pesada/cal analisadas. Para avaliação do comportamento mecânico foram usados os seguintes parâmetros:

- CBR;

- Expansão;
- Resiliência, e
- Resistência a compressão.

b) Análise das Interações Ambientais: São apresentadas as composições químicas dos materiais, suas classificações quanto a periculosidade e os resultados dos ensaios de lixiviação, solubilização e percolação.

• **Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações**

Faz-se uma síntese dos resultados obtidos em relação ao objetivo da pesquisa. Destacam-se os aspectos negativos e positivos da utilização de misturas solo/cinza pesadas na pavimentação.

São sugeridas, considerando os resultados dos ensaios de laboratório realizados, as condições em que a utilização das misturas solo/cinza pesada podem apresentar melhor resultado e quais os aspectos que ainda podem ser mais estudados visando a sua utilização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Origem e Características da Cinza Pesada

A cinza pesada é um rejeito da queima do carvão mineral em plantas de geração de energia termelétrica. É um resíduo industrial e, portanto, está sujeito a condições e normas específicas para sua disposição no meio ambiente.

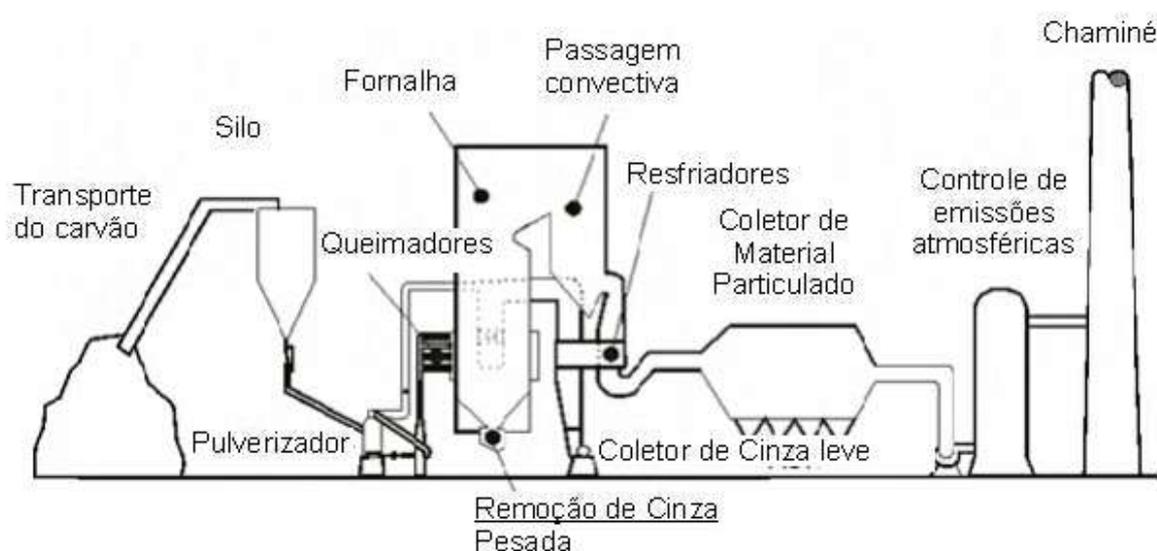
Quando o carvão pulverizado é queimado, cerca de 80% do material não queimado e as cinzas do processo de queima são recuperados nas tubulações de exaustão de gás. Esse material é conhecido como cinza volante. Os 20% restantes, são cinzas secas pesadas (bottom ash). O material é coletado em um recipiente cheio de água posicionado em baixo da câmara de combustão. Quando uma quantidade suficiente de cinza pesada está no recipiente, esse é removido através de um jato de água de alta pressão e conduzido por um canal de limpeza para tanques de disposição ou para bacias de decantação para perda de umidade (NARDI, 1998).

A Figura 2.1, apresenta um diagrama de utilização do carvão mineral em plantas termelétricas. A composição química da cinza pesada é controlada basicamente pela fonte do carvão mineral, sendo composta principalmente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), que correspondem à cerca de 50% e 30%, respectivamente, na composição em massa do material. Cinzas pesadas derivadas de Linhita¹ ou carvão sub-betuminoso têm maior porcentagem de cálcio do que a cinza pesada derivada do antracito ou de carvão betuminoso. Entretanto, os sulfatos usualmente apresentam-se com porcentagens menores que 1%, (KE et al, 1992).

As propriedades físico-químicas da cinza pesada variam devido à composição do carvão, do grau de moagem adotado no beneficiamento, na pré-queima e do sistema de extração e transporte da cinza após a queima (GOTHE, 1990).

O Quadro 2.1 apresenta os resultados de análises químicas de cinza pesada de diferentes tipos de carvão mineral, de diferentes regiões dos EUA e o Quadro 2.2, apresenta a composição da cinza pesada originária da Termelétrica Jorge Lacerda (SC) determinadas por GOTHE (1990) e POZZOBOM (1997), que estudou a aplicabilidade da cinza pesada em componentes pré-fabricados.

¹ Carvão fóssil da era mesozóica que pode conservar ainda a estrutura lenhosa e possuir de 57% a 80% de carbono.



Fonte: University of North Dakota - Coal Ash Research Center. obtida no dia 25 de março de 2002 em <http://www.undeerc.org/carrc/html/CoalCombustion.html>

Figura 2.1 - Processo de queima do carvão mineral em usinas termelétricas.

Nos quadros 2.1 e 2.2, nota-se que, de maneira geral, a composição química da cinza pesada varia de 40% a 70% de sílica, de 15% a 30% de alumina e de 2,0% a 14% de óxido de ferro, o que corresponde a praticamente 95% do total da composição do material. O restante é formado por outros óxidos, traços de outros metais como chumbo e mercúrio e sulfatos em percentuais inferiores a 0,1%.

Quadro 2.1 - Composição química da cinza pesada (porcentagem em peso)

Tipo do carvão	Betuminoso		Sub-betuminoso	Linhita
	West Virginia	Ohio		
Localização	West Virginia (%)		Ohio (%)	Texas (%)
SiO ₂	53,6	45,9	47,1	70,0
Al ₂ O ₃	28,3	25,1	28,3	15,9
Fe _s O ₃	5,8	14,3	10,7	2,0
CaO	0,4	1,4	0,4	15,3
MgO	4,2	5,2	5,2	3,1
Na ₂ O	1,0	0,7	0,8	1,0
K ₂ O	0,3	0,2	0,2	-

Fonte: MOULTON (1973).

Quadro 2.2 - Composição química da cinza pesada (elementos maiores)

Constituintes	Composição (%)	
	GOTHE (1990)	POZZOBOM (1997)
	Cinzas leves e pesadas	Cinza Pesada
SiO ₂	51,9 a 56,3	55,98
Al ₂ O ₃	27,2 a 32,6	26,73
Fe ₂ O ₃	7,5 a 12,2	5,80
TiO ₂	-	1,33
P ₂ O ₅	0 a 0,1	0,24
CaO	0,6 a 2,2	0,84
MnO	-	0,02
MgO	0,1 a 1,4	0,59
Na ₂ O	0,2 a 0,3	0,25
SO ₃	0,01 a 0,1	-
K ₂ O	0,2 a 5,5	2,59

Fonte: POZZOBOM (1997).

2.2 A Utilização de Cinzas na Pavimentação - Experiências Internacionais

De maneira geral, a escassez de jazidas de materiais convencionais e a disponibilidade de grandes quantidades de resíduos ao redor do mundo foram as grandes forças motivadoras dos estudos visando à utilização desses materiais.

A utilização de materiais residuais na engenharia rodoviária, entre estes as cinzas pesadas descartadas por usinas termelétricas movidas a carvão mineral, é uma realidade a muitos anos em países como Reino Unido (DAWSON et al, 1993) e Estados Unidos (MOULTON, 1973).

Ensaio de compactação e CBR realizados com cinzas pesadas geradas em usinas termelétricas britânicas, cuja granulometria é mais grossa em relação à cinza pesada brasileira, forneceram teores de umidade ótima médios de 18%, massa específica aparente seca variando de 0,99 g/cm³ (9,70 KN/m³) a 1,37 g/cm³ (13,43 KN/m³) e CBR de 27% a 30% (DAWSON et al, 1991, p. 994).

Variações no comportamento geotécnico entre a cinza pesada brasileira, em particular a gerada na Termelétrica Jorge Lacerda, e a cinza pesada britânica podem ser esperadas devido à diferença na granulometria. O carvão mineral brasileiro, com poder calorífico menor, necessita passar por um processo de moagem para ser otimizado no processo de queima, o que resulta em uma cinza pesada de menor granulometria.

O poder cimentante da cinza pesada está relacionado com o tipo e a quantidade de carbonatos presentes, sendo que em virtude dos baixos percentuais de óxido de cálcio pode-se esperar limitações no desenvolvimento de reações

autocimentantes (DAWSON et al, 1991, p. 999).

Nos Estados Unidos e no Canadá, a aplicação de sub-produtos da queima do carvão e de processos de incineração tem sido feita principalmente em rodovias não estaduais (SCHROEDER, 1994).

O Quadro 2.3 apresenta alguns locais onde foram aplicados materiais residuais em serviços de pavimentação.

Quadro 2.3 - Locais onde foram aplicadas cinzas com outros materiais na pavimentação

Projeto	Aplicação	Quantidade	Materiais
Route 2	6,4 km	404.000 m ³	Escória de alto forno: 80 – 85%
Moundsville, W. VA. (1972) ^a	Base granular 22,9 cm	225.000 tons	Escória de caldeira primária: 10 – 15%
Interstate 79 Bridgeport, W VA. (1972) ^b	5,6 km Base granular 22,9 cm	161.000 m ³ 178.000 tons	Cinza pesada – 100%
Highway 18 Saskatchewan, Canadá (1976 e 1977) ^c	2,9 km Base granular 53,3 cm	32.000 m ³ 35.000 tons	Mistura de cinza pesada retirada de lagoa cinza pesada de pilha e cinza volante
Highway 47 Estevan, W. VA. (1977) ^b	25,7 km Base granular 25,0 cm	135.000 m ³ 150.000 tons	Mistura de cinza pesada retirada de lagoa cinza pesada de pilha e cinza volante
Subdivision Development Cartersville, GA (1892) ^d	Base granular 10,1 cm	1150 m ³	Cinza pesada

(a) BLOCKER et al, (1973); (b) SEALS et al, (1972); (c) CULLEY et al, (1979); (d) JONES, (1982)

Fonte: SCHROEDER, 1994.

Autumn apud SCHROEDER (1994, p.8), também apresenta a cinza pesada como material adequado para ser utilizado em camadas de sub-base de pavimentos e como material fino (filler) para ser usado em misturas asfálticas.

Com o crescente aumento dos critérios de controle por parte das agências ambientais com relação a busca de novas jazidas, a utilização de materiais residuais vem sendo cada vez mais difundida em todo o mundo. Tendo em vista estes critérios, as experiências internacionais atuais sobre a utilização de rejeitos na

pavimentação demonstram que, além das análises quanto ao desempenho geotécnico dos materiais na estrutura do pavimento, também devem ser avaliados os demais aspectos decorrentes da inserção desses materiais no ambiente.

NUNES et al, (1996), do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Nottingham, avaliaram, juntamente com outros materiais residuais, o emprego da cinza pesada oriunda da queima do carvão mineral na pavimentação.

Os estudos realizados por NUNES op. cit, indicam os seguintes benefícios da utilização desses materiais na pavimentação:

- Redução da demanda de materiais primários;
- Redução dos custos energéticos relacionados com a extração e o transporte de agregados convencionais;
- Redução dos custos ambientais associados com a recuperação dos passivos ambientais gerados pela exploração de jazidas de materiais convencionais;
- Redução dos problemas ambientais e econômicos associados com a estocagem e disposição final dos resíduos; e,
- Prováveis benefícios comerciais advindos do uso de materiais residuais, visto que são financiados pelos processos que os geram, não são vendidos até o momento, pois os geradores tem custos associados com à estocagem e a disposição final.

Os autores avaliaram o desempenho de diversos resíduos em relação aos aspectos mecânicos voltados para aplicação do material em camadas de sub-base de pavimentos e aos riscos para o meio ambiente, sendo que a metodologia usada em seus estudos para avaliação do desempenho mecânico dos materiais secundários pode ser subdividida em 3 estágios principais:

- **Estágio 1** - Consiste da avaliação geral dos materiais usando testes convencionais de caracterização e classificação, tais como: distribuição granulométrica, plasticidade da fração fina (<0,42mm), absorção, densidade da partícula, integridade ao sulfato de magnésio e testes de compatibilidade;
- **Estágio 2** – Os materiais são testados sem a adição de qualquer agente cimentante. São realizados ensaios de compressão triaxial dinâmico para determinar o comportamento das deformações resilientes e permanentes. Os resultados obtidos através destes ensaios são analisados com o objetivo de avaliar se o material tem um comportamento aceitável para ser usado em seu estado natural em camadas do pavimento. Valores que poderiam ser esperados dos materiais convencionais são tidos como referência para determinar a adequação do material. Por exemplo, é reconhecido que um módulo resiliente (M_r)

acima de 200MPa deve ser esperado de um material convencional granular não-ligante oriundo de rocha britada de boa qualidade; e

- **Estágio 3** - Caso os materiais em seu estado natural não apresentem uma performance satisfatória, considerando o módulo resiliente, realiza-se tratamentos com a adição de materiais cimentantes até atingir os critérios de aceitação, que são definidos pela performance adequada nos testes de compressão triaxial dinâmico (após 28 dias de cura) e pela durabilidade apropriada da mistura.

As experiências com a cinza pesada, objetivando seu uso em camadas de sub-base, demonstraram que para condições secas, as deformações permanentes na base da camada são maiores do que em camadas de agregados britados, porém em condições úmidas as deformações permanentes na base da camada são semelhantes (DAWSON, et al, 1993).

2.3 A Utilização de Cinzas na Pavimentação – Experiência Brasileira

A principal utilização das cinzas oriundas da queima do carvão mineral no Brasil acontece na substituição de parte do clínquer portland por cinza leve (fly ash) na fabricação do cimento portland pozolânico. Atualmente 100% da cinza leve produzida na Termelétrica Jorge Lacerda é consumida pela indústria do cimento.

O desenvolvimento de compósitos polímeros adicionando cinzas pesadas e leves oriundas da queima do carvão mineral também foi objeto de estudo de NASCIMENTO e ABREU (1990), que devido à presença de microesferas ocas com cerca de 100µm nas cinzas pesadas e a presença de finos esféricos nas cinzas leves, com possibilidade de separação, poderiam ser introduzidas em matrizes polímeras. Os resultados foram bastante otimistas, sendo que as partículas esféricas mostraram-se facilmente incorporadas e dispersas na matriz do polímero, produzindo compósitos de cor cinza, brilhantes, homogêneos e aptos para a aplicação em bóias utilizadas na exploração de petróleo em águas profundas e em diversos equipamentos da indústria náutica.

A utilização dos subprodutos da queima do carvão mineral pela indústria do cimento é um método seguro e benéfico ao meio ambiente por otimizar a energia gerada nos processos envolvidos e reduzir as pressões sobre os recursos minerais, com a exploração de jazidas de calcário e argila (ISAIA, 1996).

Na prática, já constata-se a utilização de cinzas pesadas em obras de infra-estrutura e urbanização nas áreas periféricas dos municípios de Charqueadas e São Jerônimo, no Rio Grande do Sul. (UFRGS/Centro de Ecologia, 2000, p. 467).

Na área da construção civil, as experiências existentes são ligadas principalmente a utilização da cinza em artefatos de concreto. Com essa finalidade destaca-se a pesquisa realizada por POZZOBOM (1997) no Núcleo de Pesquisa em Construção Civil (NPC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) que, além de comprovar a viabilidade da aplicação da cinza pesada em artefatos de concreto para a construção civil, também analisou sua utilização na fabricação de briquetes de concreto para a pavimentação. Em suas pesquisas, as peças de concreto foram dosadas com a substituição de 30% do cimento por cinza pesada.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples (fck), aos 14 e aos 28 dias, enquadraram-se nos intervalos de aprovação da NBR-9781 – Peças de Concreto Para a Pavimentação, aprovando suas características de resistência mecânica para utilização na pavimentação. A cinza pesada analisada nessa pesquisa foi obtida junto às bacias de sedimentação da Termelétrica Jorge Lacerda.

Além das aplicações em matrizes de concreto, também foram desenvolvidos no Brasil estudos analisando a utilização das cinzas resultantes da queima do carvão mineral em estruturas semi-rígidas e flexíveis de pavimentos, sendo que diversos autores já comprovaram a viabilidade de sua utilização na pavimentação no que se refere ao desempenho mecânico da utilização de cinzas.

Os estudos desenvolvidos por NARDI (1975) e posteriormente complementados pelas pesquisas realizadas por MARCON (1977), comprovaram a viabilidade da estabilização de areia com cinza volante e cal.

Os trabalhos desenvolvidos por NARDI (op. cit.), resultaram na implantação de um trecho experimental localizado às margens da BR-101, no município de Imbituba/SC, onde, sobre o subleito de areia, foi construída uma sub-base de areia estabilizada com cal e cinza volante. Nesse trecho foram instaladas seções de instrumentação e os resultados monitorados foram bastante satisfatórios e aprovaram o desempenho do material.

Com a finalidade de complementar os estudos realizados por NARDI (1975), MARCON (1977) desenvolveu ensaios de durabilidade e módulo de elasticidade em misturas de areia, cinza volante e cal e areia, brita, cinza volante, cal e cimento. Nos resultados de suas pesquisas os materiais resultantes se mostraram com aptidão para serem empregadas em bases e sub-bases de pavimentos, desde que observadas as condições de cura, as solicitações de tráfego e devendo ser avaliada a rigidez da camada da base, de modo a promover a redução das tensões

verticais transmitidas ao subleito e retardando os efeitos de fadiga. Com esse aspecto, um bom processo de cura torna-se importante à medida que, com aumento da resistência do material com o passar do tempo, também é retardado o desenvolvimento de fissuras no material.

2.4 Avaliação das Interações Ambientais do Uso de Resíduos na Pavimentação

Referências sobre a avaliação conjunta entre os aspectos de desempenho mecânico e as interações ambientais devido a utilização de materiais residuais, foram relatadas por NUNES et al, (1996). Em seus estudos são feitas recomendações quanto à necessidade da definição de protocolos lógicos para a avaliação da periculosidade decorrente da utilização de materiais residuais na pavimentação. A avaliação ambiental do uso de materiais residuais em pavimentos foi calçada em métodos adotados pelo Centro Tecnológico de Águas Residuárias Canadense (Wastewater Technology Centre), que visavam avaliar o sucesso da inertização de resíduos sólidos através da adição de materiais cimentantes aos mesmos.

As avaliações de risco ambiental, apresentadas por NUNES (op. cit), também podem ser subdivididas em três estágios:

- **Estágio 1** - Os materiais são caracterizados quanto às suas origens e suas propriedades físico-químicas;
- **Estágio 2** - São realizados dois testes de lixiviação nos materiais em seu estado natural, sendo o primeiro convencional e o segundo em uma solução de valores baixos de pH. Tais testes são similares aos testes de lixiviação (NBR 10005 – Lixiviação de resíduos) e solubilização (NBR 10006 – Solubilização de resíduos), realizados no Brasil;
- **Estágio 3** - São feitos testes de lixiviação com os materiais em condições ideais de aplicação na estrutura do pavimento. Nesse estágio, os ensaios são realizados em condições de drenagem e saturação similares às condições de utilização no pavimento.

Testes de lixiviação em resíduos para aplicação em pavimentação nas condições específicas em que serão utilizados, apresentam resultados mais representativos do que nos testes de lixiviação tradicionais (SLOOT et al, 1989).

Buscando analisar os materiais em situações mais próximas às condições em que são submetidos na estrutura do pavimento, HILL et al (2001), apresentaram a utilização do “Lisimeter trials test”, que consistem em células com 1,0m² de área

superficial, onde coloca-se uma camada de 35,0cm de espessura do material a ser analisado, nas condições de massa específica e umidade ótimas para seu emprego na estrutura do pavimento. Tais células são submetidas às intempéries e são feitas análises químicas para avaliação dos contaminantes presentes no líquido percolado. Segundo seus estudos, em condições realistas de compactação e granulometria, o potencial de contaminação de muitos materiais foi menor do que se tivessem sido analisados em testes de lixiviação convencionais.

Os estudos elaborados por HILL (op. cit), dentre outras conclusões, mostraram que:

- As quantidades totais e as taxas de lixiviação observadas são afetadas pelas condições do material (granulometria, compactação, estabilização química);
- As taxas de lixiviação e solubilização não podem ser determinadas pela composição do material;
- Em geral, materiais compactados tem taxas menores de lixiviação do que materiais não compactados;
- As taxas de lixiviação são muito influenciadas pelo pH do meio; e,
- Sob condições realistas de compactação, simuladas no “Lisimiter trials test”, muitos materiais residuais atendem às especificações de qualidade das agencias de proteção ambiental.

Análise das cinzas geradas nas Termelétricas Jorge Lacerda (SC) e Charqueadas (RS), visando avaliar a periculosidade de acordo com as prescrições da NBR 10.004 – Resíduos Sólidos, Classificação, enquadraram o material como não inerte e não tóxico, ou seja, classe II. Os resultados são apresentados no Quadro 2.4 (GOTHE, 1990).

Quadro 2.4 - Composições da cinza pesada quanto aos elementos perigosos da NBR 10004/87

Parâmetros	J. Lacerda III (mg/kg)	Charqueadas (mg/kg)
Arsênio total (As)	3,6	0,6
Bário total (Ba)	300	100
Cadmio total (Cd)	<0,2	<0,2
Chumbo total (Pb)	1,4	3,2
Cromo total (Cr+6+3)	8,4	6,0
Ferro total (Fe)	5820,0	6080,0
Manganês total (Mn)	62,8	63,8
Zinco total (Zn)	19,6	26,0
Mercúrio total (Mg)	0,18	0,01
Cobre total (Cu)	7,6	12,6
Prata total (Ag)	<0,2	0,8
Selênio total (Se)	0,2	0,2
Cianetos totais (CN-)	<1,0	<1,0
Fenóis	0,2	0,3

Fonte: GOTHE (1990)

2.5 Parâmetros de Qualidade Para o Solo e Para as Águas Subterrâneas

Analisando-se os procedimentos adotados pelas agências ambientais nacionais e internacionais, nota-se que não há uma padronização das metodologias de análise da qualidade do solo em termos ambientais, como acontece no caso da água e do ar, onde padrões internacionais são facilmente difundidos e adotados globalmente.

Segundo VISSER apud CASARINI et al (2001), as metodologias adotadas pelas agências de proteção ambiental, diferenciam-se na tomada de decisões quanto à intervenção em um possível local contaminado, pela utilização de parâmetros de qualidade pré-estabelecidos e por ações tomadas a partir da avaliação de riscos, caso-a-caso.

No Brasil, CASARINI et al (2001), coordenaram na CETESB a realização dos principais estudos de avaliação da qualidade de solos e águas subterrâneas quanto aos riscos ambientais.

CASARINI (op. cit, p.10) apresentam o conceito de Valor de Referência de Qualidade como "... o limite de qualidade para um solo considerado limpo". Para obtenção desses parâmetros foram realizadas análises químicas em diversos tipos de solos do estado de São Paulo. Foram coletados solos de áreas contaminadas e em regiões consideradas intocadas e com elevado grau de conservação ambiental. Os valores apresentados servem para balizar decisões quanto à intervenção ou não em um sítio contaminado e são subdivididos em: Valores de Referência de

Qualidade, Valor de Alerta e Valores de Intervenção, que podem ocorrer em cenários de ocupação antrópica, agrícola, industrial e/ou residencial.

2.5.1 Valores de qualidade para os solos

Segundo CASARINI et al (2001, p.75) o valor de qualidade de alerta tem como função:

“... orientar a aplicação de lodo de estação de tratamento, aplicação de insumos agrícolas fabricados a partir de resíduos industriais, tratamento de resíduos no solo (landfarming), avaliação da qualidade de solos utilizados em terraplenagem e avaliação de fonte de contaminação por deposição atmosférica de material particulado (ex.: chumbo secundário)”,

ou seja, esse valor indica uma possível alteração da qualidade natural dos solos e águas subterrâneas e quando excedido, há um potencial poluidor para esses meios, devendo ser exigido um monitoramento, efetuando-se um diagnóstico de qualidade, identificando-se e controlando-se as possíveis fontes de contaminação, de modo a cessar o aporte de poluentes.

O Valor de Intervenção indica o limite de contaminação do solo e das águas subterrâneas, acima do qual, existe risco potencial à saúde humana, e será utilizado em caráter corretivo no gerenciamento de áreas contaminadas e quando excedido, requer alguma forma de intervenção na área avaliada, de forma a interceptar as vias de exposição, devendo ser efetuada uma avaliação de risco caso a caso.

Esse valor foi derivado com base em modelo matemático de avaliação de risco, considerando diversas vias de exposição em três cenários de uso e ocupação do solo (agrícola, residencial e industrial).

2.5.2 Valores de qualidade para a água subterrânea

A qualidade das águas subterrâneas guardam uma estreita relação com as características químicas dos meios por onde percolam. Tais características são influenciadas pelos tipos de rochas, solos e as demais alterações antrópicas dos locais drenados (ZIMBRES, 2003).

Estudos realizados por ALEXANDRE e SZIKSZAY (1999), em solos contaminados por arsênio (As), cobre (Cu), chumbo (Pb), e zinco (Zn), provenientes de herbicidas e fungicidas em solos e águas do lençol freático na região de Jundiaí/SP, concluíram que os solos tropicais apresentam forte tendência à retenção de metais.

Nos estudos realizados pela CETESB (CASARINI, op. cit, p.88) para o estabelecimentos de valores de referência para intervenção em águas subterrâneas, tal recurso hídrico “foi considerado uma reserva estratégica de abastecimento de água” devendo, dessa forma, ser preservado em função da escassez de água superficial, do seu atual nível de deterioração e do elevado custo de tratamento para fornecimento de água com qualidade. Assim, o Valor de Intervenção foi determinado como sendo os padrões de potabilidade da águas da Portaria 36 de 1990, atualizados pela Portaria 1.469 de 29/12/2000, ambas do Ministério da Saúde.

2.6 Classificação da Periculosidade Dos Resíduos Sólidos no Brasil

No Brasil, a classificação dos resíduos sólidos é feita de acordo da NBR 10.004 Resíduos Sólidos – Classificação. Essa norma foi revisada em outubro de 2004, porém, na ocasião da realização dos ensaios da pesquisa estavam em vigor as metodologias publicadas pela ABNT na versão de 1987. Dessa forma, os resultados apresentados são baseados nos parâmetros de referência dessa publicação.

De acordo com essa metodologia os resíduos sólidos são classificados como:

- Resíduos classe I – Resíduos perigosos;
- Resíduos classe II – Resíduos não-inertes; e,
- Resíduos classe III – Resíduos inertes.

As classes são definidas através de análises da composição dos resíduos e pela realização de ensaios de lixiviação e solubilização (ABNT, 1987).

Essa classificação serve para balizar os procedimentos necessários para o tratamento a ser dado no descarte de resíduos sólidos decorrentes de processos industriais.

Com base nesses testes e, através da comparação das concentrações lixiviadas e solubilizadas com os padrões estabelecidos na norma, um resíduo sólido é classificado como inerte ou não inerte. Quando a concentração de qualquer elemento químico considerado perigoso ultrapassa o limite estabelecido, o resíduo é classificado como perigoso, ou seja, classe I. Características como corrosividade, inflamabilidade e reação violenta com água também enquadram os resíduos como perigosos. Mais informações sobre o estabelecimento de Valores de Referência e classificação dos resíduos sólidos podem ser encontradas em CASARINI et al, (2001).

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

O estudos para avaliação do comportamento da cinza pesada na pavimentação seguiram quatro etapas.

As etapas consideradas na pesquisa foram baseadas nos estudos de NUNES et al (1996), desenvolvidos na Universidade de Nottingham que, para a avaliação da utilização de materiais residuais na pavimentação, também consideraram os aspectos de desempenho mecânico e as interações ambientais.

3.1 Etapa I - Caracterização dos materiais

Para caracterização dos materiais utilizados na pesquisa foi seguido o procedimento apresentado na seqüência.

3.1.1 Caracterização do solo

3.1.1.1 Caracterização física

- a) Granulometria: Ensaios realizados de acordo com a NBR 7181/84;
- b) Módulo de finura: Para sua definição, a partir do ensaio de granulometria, soma-se às porcentagens retidas nas peneiras da serie normal e dividi-se por cem. Quanto maior o módulo de finura mais grosseiro é o material. As peneiras da serie normal são as de malha 0,15mm; 0,30mm; 0,60mm , sempre dobrando o valor da abertura malha. Também se deve transportar os valores de porcentagem de peneiras que estão fora da serie para uma peneira da serie;e,
- c) Limites de Atterberg LL e LP: Os ensaios de limíte de liquidez e limite de plasticidade, foram desenvolvidos segundo as normas brasileiras NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente.

3.1.1.2 Caracterização geotécnica

- a) Ensaio de compactação: Foi executado de acordo com a norma NBR 7182/84, na energia do Proctor Normal. Os ensaios foram elaborados sem o reuso do material. (amostra virgem);
- b) Ensaio de CBR com medida de expansão: Foi realizado de acordo com a NBR 9895/86. O CBR foi determinado para cada ponto da curva de compactação;
- c) Determinação do Módulo Resiliente: Ensaio executado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), segundo a metodologia 133/94.
- d) Ensaios de resistência à compressão simples: A resistência à compressão simples foi determinada em corpos-de-prova de 5,0x10,0 cm. Na moldagem dos CP's

procurou-se reproduzir as condições de massa específica máxima seca e umidade ótima obtida nos ensaios de compactação. Foram realizados ensaios com períodos de 14 e 90 dias de cura.

3.1.2 Caracterização da cinza

3.1.2.1 Caracterização física

Foram usados os mesmos métodos de caracterização do solo.

3.1.2.2 Caracterização geotécnica

Foram usados os mesmos métodos de caracterização do solo. Particularidades podem ser mencionadas somente no ensaio de compactação, onde devido a notória dificuldade de compactação da cinza pesada, regularizava-se a superfície de cada camada de material no cilindro do ensaio de compactação em cada intervalo das séries de golpes de compactação.

3.2 Etapa II – Caracterização de Misturas Solo/Cinza

Nessa etapa, avaliou-se o comportamento geotécnico de misturas entre o solo e a cinza pesada, visando seu emprego na pavimentação. Os ensaios procuraram diagnosticar se as misturas solo/cinza pesada poderiam, do ponto de vista geotécnico, ser utilizadas na camada final de terraplenagem ou em camadas da estrutura do pavimento.

3.2.1 Misturas estudadas

Na pesquisa, as misturas são designadas por solo/cinza e adotou-se a notação de relação entre os percentuais em peso dos materiais a serem misturados, para a apresentação das misturas. Por exemplo, a mistura entre 50% de solo e 50% de cinza, em peso, é rerepresentada pela notação 50/50. Sempre o primeiro número refere-se à porcentagem de solo e o segundo à de cinza.

Na Etapa II, foram estudadas as misturas solo/cinza, contendo os percentuais apresentados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Misturas solo/cinza estudadas

Misturas	% de solo	% de cinza	Representação
1	100	0	100/0
2	70	30	70/30
3	50	50	50/50
4	30	70	30/70
5	0	100	0/100

3.2.2 Ensaios realizados

Para caracterização geotécnica das misturas solo/cinza, foram realizados os seguintes ensaios:

- a) Ensaio de compactação: Elaborados de acordo com a NBR 7182/84, na energia do Proctor Normal. Os ensaios foram conduzidos sem a reutilização do material em cada ponto da curva. (amostra não trabalhada);
- b) Ensaio de CBR com medida de expansão: Realizado de acordo com a NBR 9895/86, sendo moldado um corpo-de-prova de CBR para cada ponto da curva de compactação. ;
- c) Determinação do Módulo Resiliente: Ensaio elaborado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); e
- d) Ensaios de resistência à compressão simples: Nos ensaios de resistência à compressão simples das misturas solo/cinza, as avaliações foram realizadas para os períodos de 7, 14, 28 e 90 dias de cura dos corpos-de-prova, visando detectar possíveis reações cimentantes provocadas pela adição da cinza. Para a cura, após a compactação nas condições de umidade ótima, os corpos-de-prova foram mantidos dentro de sacos plásticos em câmara úmida e foram submetidos a imersão por 4 horas antes da ruptura.

3.3 Etapa III – Caracterização das Misturas Solo/Cinza/Cal

O objetivo foi avaliar a influência da estabilização com cal no comportamento geotécnico das misturas solo/cinza pesada. A estabilização das misturas com cal tem dois aspectos positivos: primeiramente a melhoria do seu comportamento geotécnico e em segundo, a redução das taxa de lixiviação de alguns metais. (NUNES et al, 1996).

3.3.1 Misturas estudadas

Seguindo-se a mesma notação dada para as misturas solo/cinza pesada, as misturas solo/cinza pesada/cal, foram representadas pelas proporções dos

materiais na mistura. Por exemplo, a mistura 70/30/4 representa a mistura com as proporções em peso de 70% de solo, 30% de cinza e 4% de cal. A proporção em peso de cal foi obtida em relação ao peso total da mistura cinza/cal.

As misturas estudadas estão apresentadas no Quadro 6.

Quadro 3.2 - Misturas solo/cinza pesada/cal estudadas

Misturas	% de solo	% de cinza	% de cal	Representação
1	100	0	4	100/0/4
2	70	30	4	70/30/4
3	50	50	3	50/50/3
4	30	70	6	30/70/6
5	0	100	5	0/100/5

3.3.2 Avaliação do teor de cal a ser empregado nas misturas solo/cinza pesada

Existem diversos métodos de dosagem do teor ideal de cal para estabilização mecânica do solo, tais como o método do pH e o Lime fixation point.

Porém, para a dosagem do teor de cal ideal para ser empregado nas misturas solo/cinza pesada, aplicou-se a metodologia proposta por NOGAMI e VILLIBOR (1995) do MCT Simplificado (Método das pastilhas). Dessa forma, considerou-se como teor ideal de cal em cada mistura solo/cinza pesada, aquele em que a mistura muda de comportamento não laterítico para laterítico.

O Ensaio de pastilha é um ensaio táctil-visual, e possibilita a classificação segundo a metodologia MCT de maneira simplificada. O método baseia-se em avaliações de pastilhas moldadas com o solo em anéis de inóx. Após moldar os anéis as pastilhas são secadas e faz-se a medida da contração diametral. Em seguida são submetidas a reabsorção de água, e faz-se a medida da expansão e da penetração de uma agulha padrão. A análise dos parâmetros permite fazer o enquadramento do solo quanto ao grupo MCT pertencente.

3.3.3 Ensaios realizados

Foram realizados os mesmos ensaios de caracterização das misturas solo/cinza pesada, na Etapa II.

3.4 Etapa IV – Avaliação das Interações Ambientais

A avaliação das interações ambientais foram baseadas nas experiências nacionais e internacionais relacionadas ao usos de materiais residuais na pavimentação.

3.4.1 Determinação da composição química dos materiais

A determinação da composição química da cinza pesada foi realizada com o objetivo de classificar sua periculosidade para disposição no meio ambiente. Como trata-se de um resíduo industrial, foram aplicados os procedimentos preconizados nas seguintes normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 10005 - Ensaio de lixiviação (1987);
- NBR 10006 - Ensaio de solubilização (1987);
- NBR 10004 - Resíduos sólidos – classificação (1987); e,
- NBR 10007 – Amostragem de Resíduos (1987).

A NBR 10004/87 apresenta listagens pré-estabelecidas de compostos ou elementos químicos perigosos e os métodos de análise dos materiais buscam detectar a presença desses compostos ou elementos listados. Para tanto, são consideradas pesquisas prévias onde são analisadas informações sobre a origem do material e históricos de outras análises químicas realizadas com materiais da mesma origem.

O método de ensaio utilizado para cada parâmetro e seu respectivo limite de detecção para o ensaio e, também, os valores de referência estabelecidos na norma para resíduos perigosos, são apresentados nos quadros 3.3 a 3.5.

Segundo a NBR 10004/87, os resíduos sólidos podem ser classificados como:

- Classe I – Perigosos;
- Classe II – Não inertes e não tóxicos; e,
- Classe III – Inertes.

3.4.2 Ensaio de percolação

Além da caracterização da cinza pesada nos procedimentos normatizados brasileiros, propôs-se um ensaio especial, visando analisar de maneira mais adequada a periculosidade do emprego da cinza pesada na pavimentação. Denominado ensaio de percolação, o ensaio foi concebido visando analisar os aspectos de interação ambiental das misturas solo/cinza pesada e solo/cinza pesada/cal, em condições que melhor reproduzissem as situações de aplicação dos materiais na estrutura do pavimento.

O ensaio proposto nessa pesquisa foi inspirado na experiência britânica com o Lisimeter Trials Test (HILL et al, 2001), sendo feitas adaptações às condições particulares. Segundo WREGG (2004, p.08), lisímetro ou, na língua inglesa, lisimeter

”... é um instrumento de medida dos componentes do balanço hídrico do solo, especificamente: infiltração e evapotranspiração”. Porém, não foi objetivo do ensaio de percolação, medir os parâmetros hidrológicos mas sim, as concentrações dos elementos perigosos que seriam lançadas no ambiente após a percolação da água da chuva na camada do pavimento construída com solo/cinza pesada ou solo/cinza pesada e cal. Apesar de não medir os parâmetros hidrológicos, as diversas células foram submetidas à percolação nas condições ambientais naturais, e dessa forma, sob influência desses fatores ambientais.

A “Célula de Percolação” foi projetada com o intuito de possibilitar a análise do material em condições de compactação iguais as de sua aplicação na pavimentação, além de assemelhar suas condições físico-químicas às da chuva.

Os corpos-de-prova foram moldados em condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima do Proctor Normal e as características físico-químicas da água chuva foram simuladas através da preparação de uma solução em laboratório. Para a preparação da solução foram usados os dados do monitoramento das chuvas na região de Tubarão, local próximo às bacias de sedimentação de cinza pesada, onde possivelmente poderão ser implantados os resultados da pesquisa.

Quadro 3.3 - Métodos utilizados na determinação da composição química do materiais

Parâmetros	Método	Limite de Detecção	V.R.*
Arsênio (mg As/Kg)	E.A.A** - Geração de Hidretos	0,001	1.000
Chumbo (mg Pb/Kg)	E.A.A** - Forno de Grafite	0,001	1000
Cianeto (mg CN/Kg)	Piridina Pirazolona	0,004	1.000
Cromo (mg Cr/Kg)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,001	100
Fenol (mg Fenol/Kg)	Aminoantipirina	0,10	10
Matéria Orgânica (%)	Refluxo com Dicromato	-	-
Mercúrio (mg Hg/Kg)	E.A.A** – Geração de Hidretos	0,001	100
pH 10%	Potenciométrico	0,01	-
Selênio (mg Se/Kg)	E.A.A** – Geração de hidretos	0,001	100
Sulfeto (mg S ⁻² /Kg)	Azul de Metileno	0,10	-
Umidade (%)	Gravimétrico	-	-
Vanádio (mg V/Kg)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,008	1.000

*V.R. – Valor de Referência – NBR 10004/87 Anexo I - Listagem 9

**E.A.A. – Espectrofotometria de Absorção Atômica

Quadro 3.4 - Métodos utilizados na determinação das concentrações dos elementos lixiviados

Parâmetros	Método	Limite de Detecção	V.R.*
Arsênio (mg As/L)	E.A.A** – Geração de Hidretos	0,001	5,0
Bário (mg Ba/L)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,008	100
Cádmio (mg Cd/L)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,0001	0,5
Chumbo (mgPb/L)	E.A.A** – Forno de grafite	0,001	5,0
Cromo (mg Cr/L)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,001	5,0
Fluoreto (mg F ⁻ /L)	SPADNS	0,20	150
Mercúrio (mg Hg/L)	E.A.A** – Geração de Hidretos	0,001	0,1
pH inicial	Potenciométrico	0,01	-
Prata (mg Ag/L)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,0001	5,0
Selênio (mg Se/L)	E.A.A** – Geração de Hidretos	0,001	1,0

*V.R. – Valor de Referência – NBR 10004/87 Anexo G – Listagem 7

**E.A.A. – Espectrofotometria de Absorção Atômica

Quadro 3.5 - Métodos de avaliação das concentrações dos elementos solubilizados.

Parâmetros	Método	Limite de Detecção	V.R.*
Alumínio (mg Al/L)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,001	0,2
Arsênio (mg As/L)	E.A.A** – Geração de Hidretos	0,001	0,05
Bário (mg Ba/L)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,008	1,0
Cádmio (mg Cb/L)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,0001	0,005
Chumbo (mg Pb/L)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,001	0,05
Cianeto (mgCN ⁻ /L)	Piridina – Pirazolona	0,004	0,1
Cloreto (mg Cl/kg)	Nitrato de Mercúrio	0,50	250
Cobre (mg Cu/L)	E.A.A** – Chama	0,001	1,0
Cromo (mg Cr/L)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,001	0,05
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	Complexometria	0,10	500
Fenol (mg Fenol/L)	Aminoantipirina	0,001	0,001
Ferro (mg Fe/L)	E.A.A** – Chama	0,005	0,3
Fluoreto (mg F ⁻ /L)	SPADNS	0,20	1,5
Manganês (mg Mg/L)	E.A.A** – Chama	0,003	0,1
Mercúrio (mg Hg/L)	E.A.A** – Geração de Hidretos	0,001	0,001
Nitrato (mg NO ₃ ⁻ /L)	Salicilato	0,20	10,0
pH final	Potenciométrico	0,01	-
Prata (mg Ag/L)	E.A.A** – Forno de Grafite	0,0001	0,05
Selênio (mg Se/L)	E.A.A** – Geração de Hidretos	0,001	0,01
Sódio (mg Na/L)	E.A.A** – Chama	0,005	200
Sulfato (mg SO ₄ ⁻² /L)	Turbidimétrico	2,0	400
Surfactantes (mgMBAS/L) (***)	Azul de Metileno	0,05	0,2
Zinco (mg Zn/L)	E.A.A** – Chama	0,001	5,0

*V.R. – Valor de Referência – NBR 10004/87 Anexo H – Listagem 8

**E.A.A. – Espectrofotometria de Absorção Atômica

*** MBAS – Substâncias ativas ao Azul de Metileno (Methylene blue active substances).

3.4.2.1 Solução de percolação

A água, por possuir uma estrutura dipolar, é um forte solvente que nas condições naturais tem seu poder aumentado pela presença de ácidos carbônicos (gás carbônico dissolvido). Tais características são um dos principais fatores do intemperismo das rochas, que tem influência direta na qualidade das águas subterrâneas. (ZIMBRES, 2003, p. 5).

O período de monitoramento da chuva utilizado na pesquisa teve início em 29 de janeiro de 1996 e fim em 12 de março de 1997 e tem seus parâmetros estatísticos básicos apresentados no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Características físico-químicas da chuva na região de Tubarão.

Parâmetros	n	Valores médios	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo
F [mg/l]	25	0,23	0,52	0,01	2,56
Cl [mg/l]	25	2,75	3,47	0,24	15,20
NO ₃ [mg/l]	25	0,43	0,34	0,01	1,31
SO ₄ [mg/l]	25	2,40	1,67	0,10	7,68
Na [mg/l]	25	1,83	2,05	0,07	8,39
NH ₄ [mg/l]	25	0,66	0,47	0,02	1,68
K [mg/l]	25	0,28	0,31	0,07	1,63
Mg [mg/l]	25	0,23	0,25	0,03	0,99
Ca [mg/l]	25	0,41	0,36	0,15	1,75
pH	25	4,58	0,63	3,00	6,20
EC [μS/cm]	25	2,52	1,87	0,60	9,60
Volume [ml]	25	2717	2676	35	10450

Fonte: Tractebel Energia (1997)

Estabeleceu-se que a solução deveria ter pH inicial igual a 5 e que as propriedades físico-químicas seriam semelhantes a da água da chuva região. Dessa forma, foram preparados 183lts da solução e foram usados os reagentes apresentados no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Reagentes utilizados na solução de percolação.

Substância	Quantidade (mg)
MgCl ₂ 6H ₂ O	858,4
NaCl	575,5
K ₂ SO ₄	384,4
(NH ₄) ₂ SO ₄	282,1
NaF	124,2
Ca(NO ₃) ₂ 4H ₂ O	176,7

Após adição dos reagentes, fez-se a correção do pH utilizando o ácido clorídrico (HCl) diluído em solução de 4.740mg/l. Foi adicionado 95ml de solução de

HCl para estabilizar o pH no momento de preparação da solução em 5,0.

A água destilada, quando rigorosamente pura, tem, aproximadamente, pH 7,0, enquanto que a água da chuva, normalmente, tem pH em torno de 5,6 (CASTRO e TARIFA, p.2, 2002).

Ao longo do período do ensaio, observou-se um aumento do pH da solução, sendo que, aproximadamente após um mês do início do ensaio, o pH aproximou-se de 6,5. A Figura 3.1 ilustra a variação do pH da solução com o tempo.

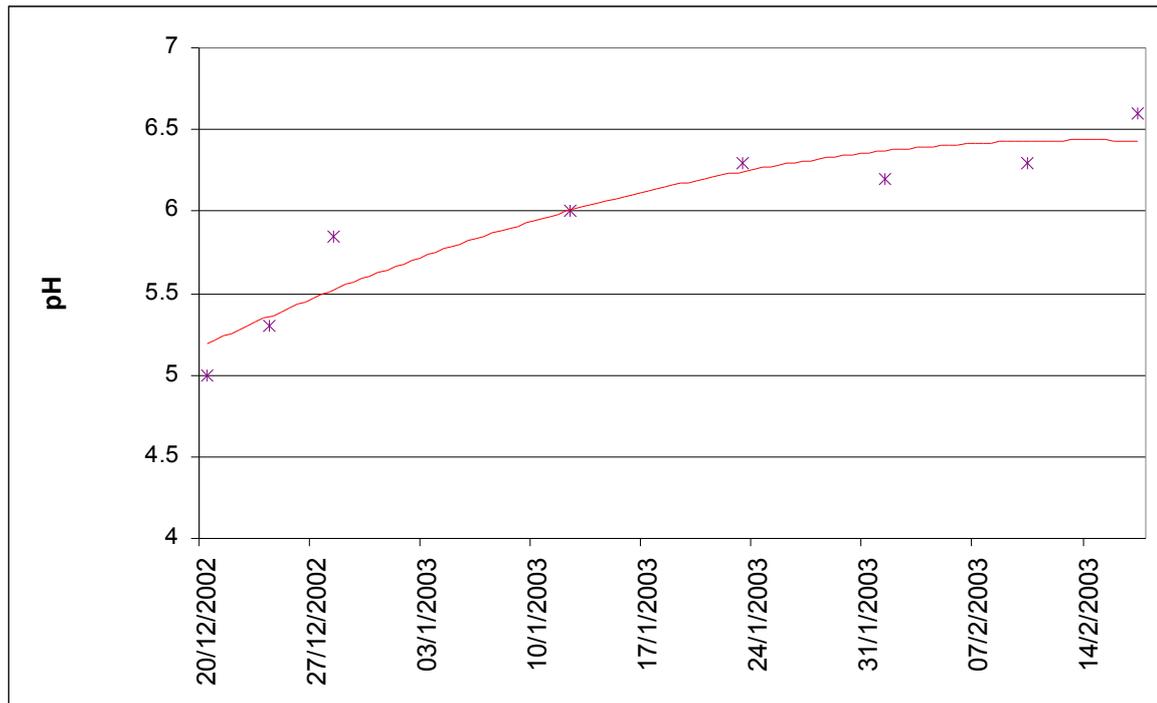


Figura 3.1 - Variação do pH da solução ao longo do período de ensaio

3.4.2.2 Células de percolação

O projeto e a montagem das Células de Percolação visaram simular as condições de campo quanto à espessura da camada de mistura no pavimento e a percolação da água através da estrutura. Foram montadas a partir de tubulações de PVC com diâmetro nominal (DN) de 200mm e com comprimento de 1,0m. Em uma das extremidades de cada tubo foram colocados CAP's e no centro de cada CAP, fez-se um orifício de 5,0mm de diâmetro para coleta da água percolada. A Figura 3.2 ilustra a célula de percolação.

Antes da montagem das células de percolação todos os materiais foram limpos com água destilada e secos em estufa visando evitar contaminações que pudessem alterar os resultados dos ensaios.

A Figura 3.3, apresenta algumas etapas da montagem das células de

percolação e a Figura 3.4 apresenta as células de percolação montadas com as respectivas misturas.

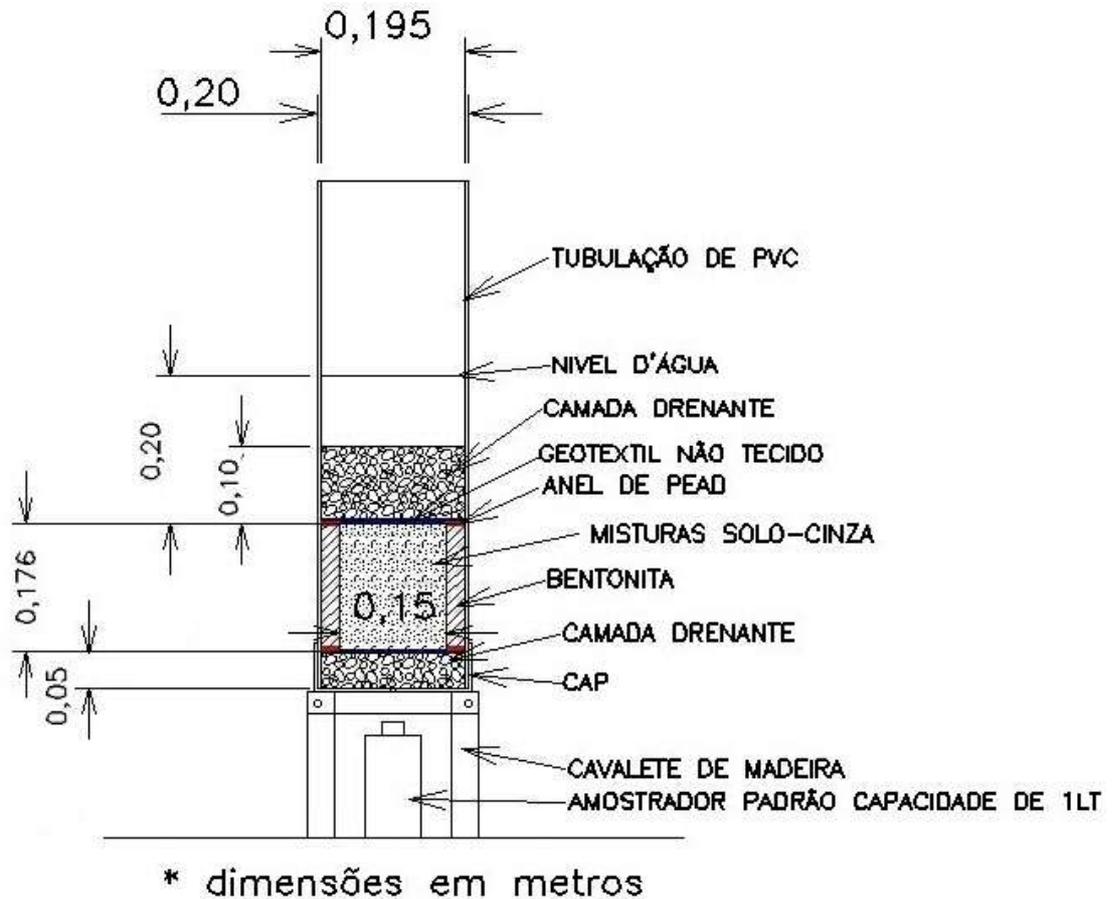


Figura 3.2 - Geometria das células de percolação.

Os corpos-de-prova foram submetidos a uma carga hidráulica inicial, sobre superfície superior do corpo de prova, de 20cm.

No momento em que se realizava cada coleta de amostras para análise, media-se o nível, anotava-se a altura d'água percolada, a data, a hora da coleta, e completava-se o nível novamente até os 20cm iniciais de carga hidráulica com a solução de percolação.

De forma sistemática, imediatamente após a coleta, as amostras eram enviadas para a análise.

Os parâmetros analisados da água percolada foram definidos com base na análise da composição química da cinza pesada e nos resultados dos ensaios de lixiviação (NBR 10005/87) e solubilização (NBR 10006/87).



CAP com a camada de brita inicial de 5,0cm e, ao lado, o anel de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) e o geotextil não tecido.

A brita e o geotextil têm função drenante. O anel de PEAD tem a função de melhorar o confinamento da bentonita e minimizar os efeitos de dilatação no ambiente saturado do interior da célula de percolação.



CAP com a camada de brita inicial de 5,0cm, o geotextil não tecido e o anel de PEAD sobrepostos.



CAP de PVC com as camadas iniciais e o corpo-de-prova de cinza pesada, compactado na umidade ótima e a 100% do PN, sobreposto.

Nessa situação foi encaixada a tubulação de PVC DN 200mm e preenchido lateralmente com bentonita, até atingir a altura do corpo de prova. Na superfície do corpo-de-prova ainda foi colocada um anel de PEAD, o geotextil não tecido e 10cm de brita.



Com a célula de percolação montada, marcou-se com um paquímetro a altura de coluna d'água adotada para o ensaio e completou-se com a solução de percolação preparada para o ensaio.

Nesse momento, anotou-se o tempom (hora) de início do ensaio de percolação na respectiva célula.

Figura 3.3 - Montagem da Célula de Percolação.

Os parâmetros monitorados nos ensaio de percolação foram: Alumínio, Ferro, Manganês, Arsênio, Chumbo, Mercúrio, pH e Acidez. Esses parâmetros foram escolhidos com base nos resultados dos ensaios de caracterização química, lixiviação e solubilização.

Para os parâmetros Alumínio, Ferro, Manganês, pH e Acidez, realizou-se análises sistemáticas em todas as amostras coletadas, já para os elementos Arsênio, Chumbo e Mercúrio, foram realizadas análises em cinco amostras coletadas ao longo do período de ensaio.

3.4.2.3 Métodos de análise química dos líquidos percolados

Os ensaios atenderam ao Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WPCF 20, e foram realizados no Laboratório de Saneamento Básico do Centro de Educação Tecnológica de Santa Catarina (CEFET/SC) e no Laboratório de Análises Químicas do Centro Tecnológico da Unisul (CENTEC). Foram usados os métodos de análise apresentados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 - Métodos de análise química do líquido percolado

Parâmetros	Método
pH	n.4500-H eletrometric method*
Acidez	n.3500-B Eriochrome Cyaine R method*
Alumínio	n.3500-A Persulfate method*
Manganês	n.3500-B Phenanthroline method*
Ferro	n.2310-B Titration method*
Mercúrio	Espectrofotômetro de absorção atômica com forno de grafite**
Chumbo	
Arsênio	

* Ver anexo 1

** Ver anexo 2



Figura 3.4 - Células de percolação e coletores de líquido percolado posicionados.

4 MATERIAIS UTILIZADOS

4.1 Jazida de Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado numa jazida de solo explorada como material de aterro no município de Tubarão, região Sul do estado de Santa Catarina. A escolha foi definida com base na análise de 9 (nove) jazidas exploradas no município.

Quadro 4.1 - Coordenadas da jazidas analisadas na pesquisa (UTM SAD 69)

Jazidas	E	N
T1	692.512	6.850.480
T2	692.820	6.851.011
T3	693.498	6.854.894
T4	694.713	6.854.750
T5	692.248	6.846.311
T7	691.762	6.845.000
T8	693.585	6.843.177
T9	694.888	6.842.940
T10	694870	6.842.870

Todas as jazidas foram classificadas segundo a metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1998). O Quadro 4.2 apresenta dos resultados do ensaio de pastilhas e a classificação segundo a metodologia MCT para as nove jazidas analisadas.

Quadro 4.2 - Classificação MCT das jazidas de solo de Tubarão.

Jazidas	Contração (mm)	Penetração (mm)	MCT
T1	2,87	0,32	LG' (Laterítico Argiloso)
T2	2,10	0,42	LG' (Laterítico Argiloso)
T3	0,00	4,00	NA (Não Laterítico Areia)
T4	1,07	0,97	LA' - LG' (Lat. Arenoso – Argiloso)
T5	0,20	7,00	NA - NS' (Não Lat. Areia – Siltoso)
T7	0,80	6,97	NS' / NA' (Não Lat. Siltoso – Arenoso)
T8	3,07	0,20	LG' (Laterítico Argiloso)
T9	1,53	6,80	NG' (Não Laterítico Argiloso)
T10	1,00	5,90	NS' - NG' (Não Lat. Siltoso – Argiloso)

Definiu-se por adotar a jazida T9 porque a utilização dos solos de comportamento não laterítico é mais interessante para um estudo da estabilização de solos com a adição de cinza e cal, pois avaliando-se o grau de melhoria nas suas

propriedades geotécnicas, pode-se aferir com maior amplitude o sucesso, ou não, do processo de estabilização. Além disso constatou-se em campo que a jazida 9 apresenta um grande volume possível de exploração.

A jazida escolhida para a pesquisa, cujo horizonte C corresponde a um solo de comportamento não laterítico argiloso, apresentou uma grande expansão, reabsorção de água e penetração total no ensaio MCT. A Figura 4.1 ilustra o perfil de solo da jazida usada na pesquisa. Ela apresenta um horizonte B pouco espesso (laterítico), e uma grande espessura do horizonte C (saprolítico, ou não laterítico).



Figura 4.1 - Perfil da jazida de solo utilizada na pesquisa.

4.2 Jazida de Cinza Pesada

A cinza pesada utilizada em todos os ensaios foi coletada na bacia de sedimentação 7 (denominada simplesmente Bacia 7), da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo/SC, contíguo ao município de Tubarão/SC.

A cinza apresentou as seguintes características geotécnicas:

- Umidade ótima: 42,0%;
- Densidade máxima seca: 0,95 g/cm³ (9,32 KN/m³);
- Índice de Suporte California: 5,0 %; e

- Expansão: 0 %

4.3 A Cal

Foi utilizada a cal hidratada calcítica, do tipo comercial. As principais características das cal são apresentadas no quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Características físico-químicas da cal hidratada

Parâmetros	Valores (%)*
CaO total	72,80
MgO	0,50
Perda ao fogo	24,60
CO ₂	1,50
CaO disponível	66,10
Fe ₂ O ₃	0,30
Al ₂ O ₃	0,40
SiO ₂	1,20
S	0,09
SO ₃	0,40
Óxidos totais	97,50
Óxidos não hidratados	0,20
Retido na peneira 0,6 mm	0,00
Retido na peneira 0,075 mm	3,50

* Dados fornecidos pelo fabricante (Votoran, 2002)

4.4 Caracterização Física dos Materiais

4.4.1 Granulometria

Os materiais foram ensaiados de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984). Para a cinza, a amostra ensaiada foi preparada de duas formas; no estado natural em que foi coletada na jazida e destorroada, com o objetivo de separar grumos de cinza da mesma forma como as amostras de solo são preparadas. Os resultados são apresentados no Quadro 4.4 e na Figura 4.2.

Quadro 4.4 - Frações de areia, silte e argila no solo e na cinza

Fração	Solo	Cinza	Cinza destorroada
Areia (%)	24,68	85,86	75,74
Silte (%)	51,72	9,44	31,12
Argila (%)	23,70	-	-

Para a cinza no estado natural e destorroada foram determinados os Módulos de finura. Para a cinza no estado natural o Módulo de finura obtido foi de 1,10 e após destorroada o valor caiu para 0,64.

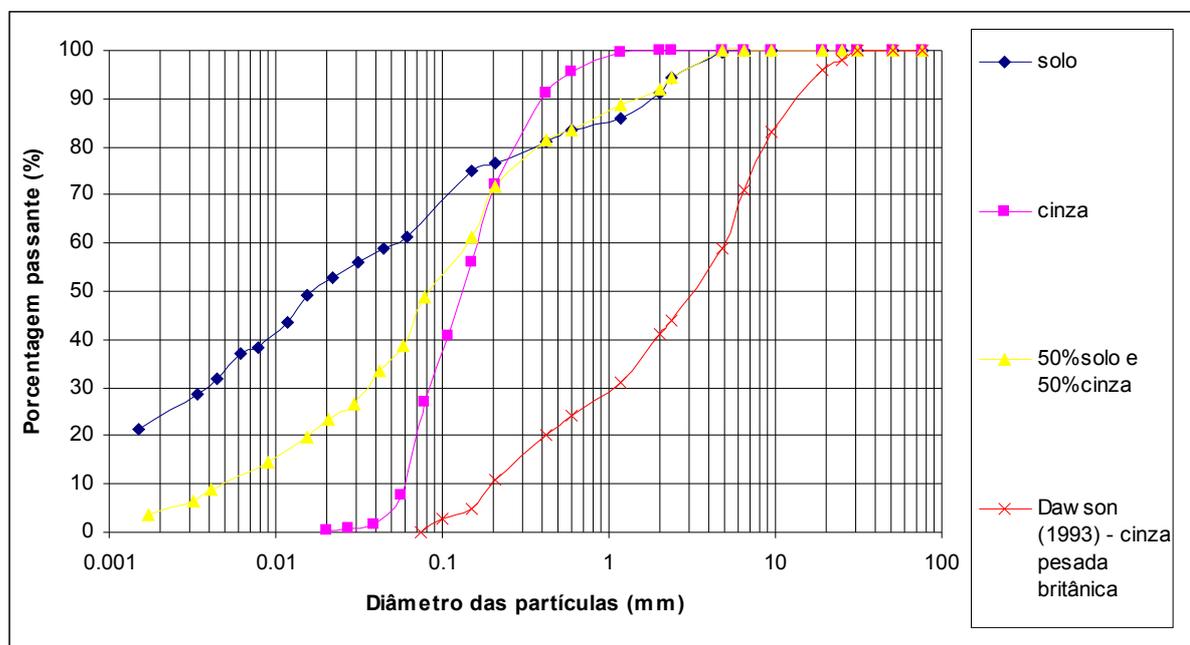


Figura 4.2 - Curvas granulométricas dos materiais.

4.4.2 Limites de Atterberg

Os ensaios para determinação dos limites de Atterberg foram executados de acordo com a NBR 6459/84 e a NBR 7180/84, onde foram obtidos os seguintes resultados:

- Limite de liquidez (LL): 49%
- Limite de plasticidade (LP): 40%

Não foi possível determinar os limites de Atterberg para a cinza pesada devido o comportamento granular do material que durante o ensaio não apresentou características plásticas para a realização dos ensaios.

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Avaliações do Comportamento Mecânico

5.1.1 Avaliação do comportamento mecânico das misturas solo/cinza pesada

Os ensaios foram conduzidos visando verificar as alterações provocadas no comportamento do solo quando adicionados percentuais de cinza.

As misturas solo/cinza pesada foram dosadas em peso e seguiram os percentuais apresentados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Misturas solo/cinza pesada analisadas

Misturas	% de solo	% de cinza	Representação
1	100	0	100/0
2	70	30	70/30
3	50	50	50/50
4	30	70	30/70
5	0	100	0/100

Os ensaios de compactação foram elaborados de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1984). A Figura 5.1 apresenta os resultado dos ensaios de compactação. A forma rugosa da superfície dos grãos da cinza pesada, resulta em uma menor densidade real dos grãos quando comparado às partículas do solo. Tal característica faz com a massa específica aparente seca diminua a medida que aumenta-se o teor de cinza pesada nas misturas.

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram como variam o CBR e a expansão de cada mistura solo/cinza pesada analisada. Os resultados obtidos mostram que a cinza propicia uma melhora significativa nas propriedades geotécnicas. Para todas as misturas ensaiadas, a adição de cinza aumenta o valor da capacidade de suporte do solo, diminui a sua expansibilidade e reduz a massa específica aparente seca. Pode-se observar que a mistura 50/50 apresenta os maiores valores de CBR.

Com a adição de 50% (em peso) de cinza pesada no solo, o valor do CBR aumenta para cerca de 22,0% e a expansão se aproxima de 0,0%. A cinza torna a mistura não expansiva, pouco sensível à umidade e com a capacidade de suporte apresentada, ela poderia ser empregada até em camadas de sub-base de uma estrutura de pavimento, notadamente em vias de baixo e médio volume de tráfego.

Dessa forma, verificou-se que, do ponto de vista de capacidade estrutural, as misturas 70/30 e 50/50 poderão ser empregadas como camada de sub-base de pavimentos, pois apresentam capacidade de suporte superior a 20% como

recomenda a metodologia de dimensionamento de pavimentos do DNER (1979).

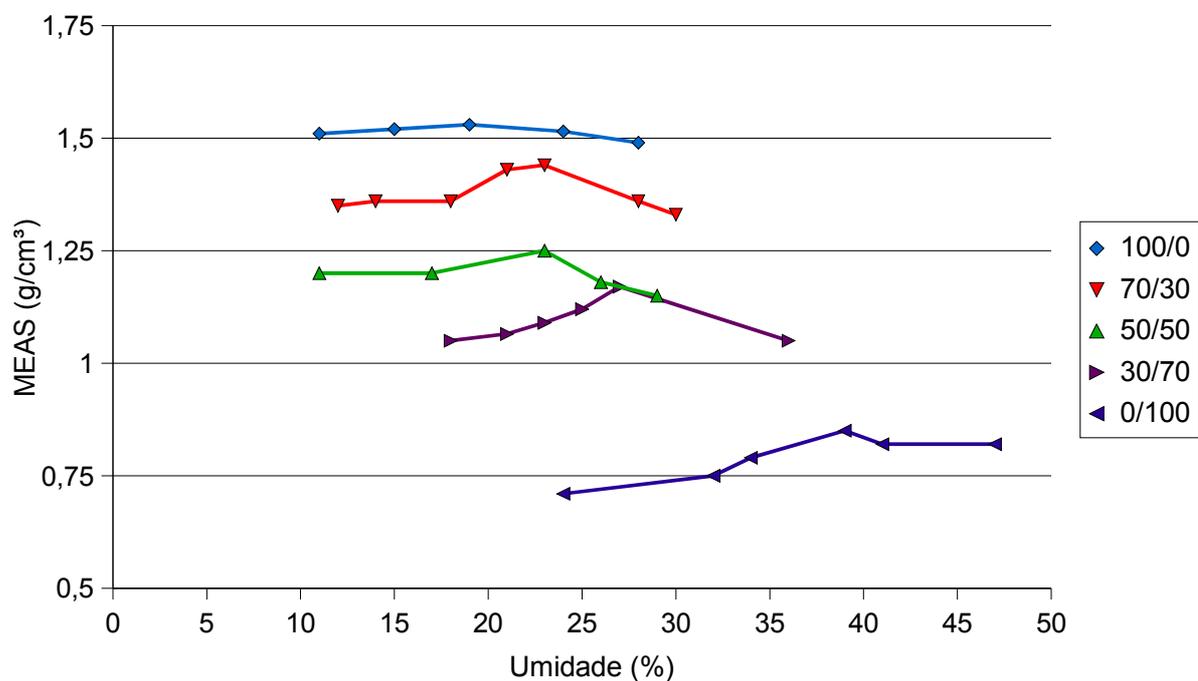


Figura 5.1 - Curva de compactação das misturas solo/cinza pesada.

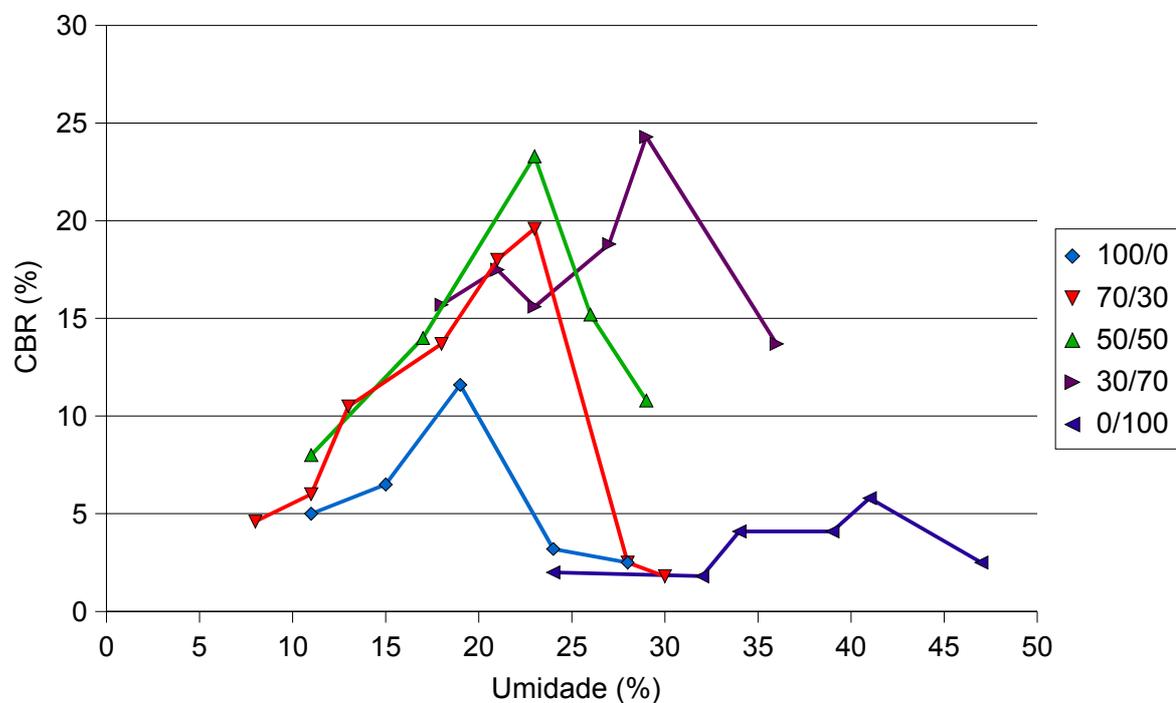


Figura 5.2 - Variação do CBR das misturas solo/cinza pesada.

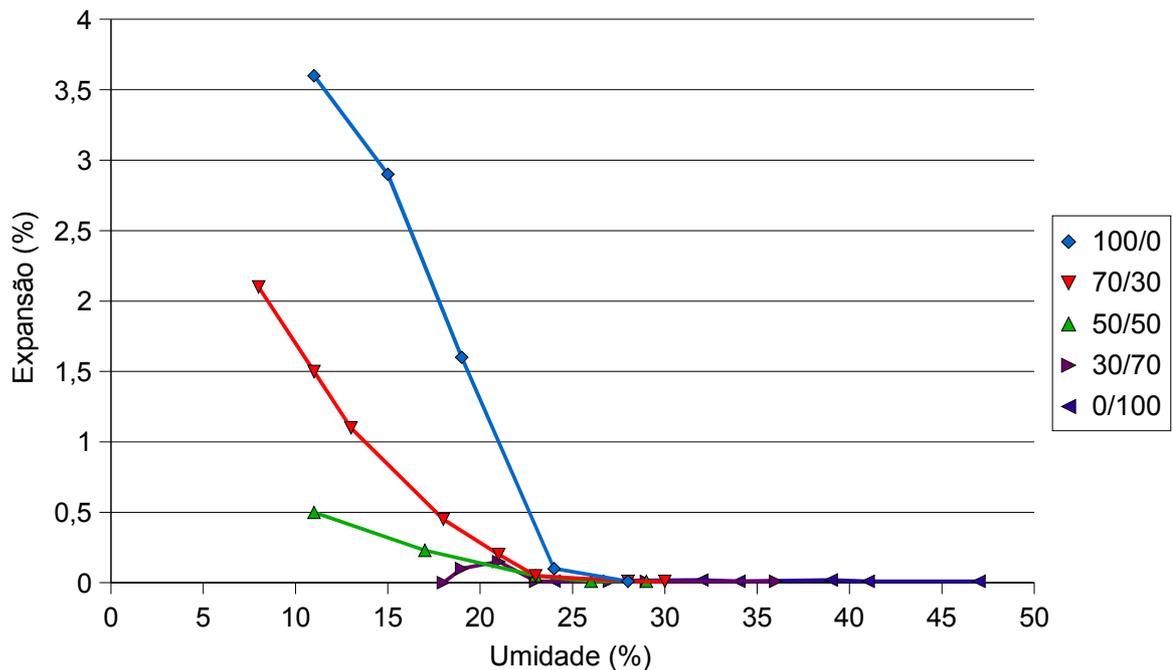


Figura 5.3 - Variação da expansibilidade das misturas solo/cinza pesada.

O Quadro 5.2 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios geotécnicos das misturas solo/cinza pesada.

Quadro 5.2 - Resultados dos ensaios geotécnicos das misturas

Misturas	Hot (%)	δs max (g/cm ³)	CBR (%) na Hot	Expansão (%)
Solo Puro (100/0)	19,0	1,71	10,6	3,6
70/30	16,7	1,59	19,2	0,6
50/50	22,6	1,37	22,6	0,0
30/70	27,0	1,30	18,8	0,0
Cinza Pura (0/100)	42,0	0,95	5,0	0,0

5.1.2 Avaliação do comportamento mecânico das misturas solo/cinza pesada/cal

Estudos elaborados por NARDI (1975) e MARCON (1977), comprovaram a melhoria no comportamento mecânico de misturas solo/cinza leve (fly ash), quando adicionado um composto cimentante como o cimento e a cal. Nessa pesquisa, como já mencionado, a avaliação do comportamento mecânico de misturas solo/cinza pesada estabilizadas com cal (solo/cinza pesada/cal) tem dois propósitos básicos: primeiro avaliar a influência da cal no comportamento mecânico; e o segundo, avaliar

a influência da cal nas interações ambientais, uma vez que a cinza é um resíduo sólido não inerte e dessa forma, sendo passível de solubilizar compostos químicos presentes em sua composição quando submetidos a percolação de água. A cal, sendo um composto cimentante, tem a capacidade de imobilizar certos compostos metálicos.

5.1.2.1 Dosagem do Teor de Cal

Os resultados dos ensaios, segundo o Método das Pastilhas (NOGAMI e VILLIBOR, 1998), adotados para definição do teor ideal de cal, são apresentados nos Quadros de 5.3 a 5.7, sendo que os teores adotados na pesquisa são os apresentados no Quadro 5.8.

Dessa forma, foram adotados como teores ótimos de cal a serem empregados nos corpos-de-prova das misturas solo/cinza pesada/cal destinadas a realização dos ensaios, os teores relativos ao ponto de modificação no compartimento não laterítico das misturas para um comportamento laterítico. Tais teores aparecem grifados nos quadros 5.3 a 5.7.

Quadro 5.3 - Resultados dos ensaios de pastilha na amostra 100/0.

Solo puro			
Teor de Cal	Penetração (mm)	Contração	Classificação
2	4,3	0,83	NS'-NA'
3	4,0	0,95	NS'-NG'
4	0,0	0,83	LA'
5	0,0	1,05	LA'-LG'
6	0,0	1,03	LA'-LG'
7	0,0	1,08	LA'-LG'

Quadro 5.4 - Resultados dos ensaios de pastilha na amostra 0/100.

Cinza pura			
Teor de Cal	Penetração (mm)	Contração	Classificação
0	5,0	0,0	NA-NS'
2	5,0	0,0	NA-NS'
3	5,0	0,0	NA-NS'
4	5,0	0,0	NA-NS'
5	0,0	0,0	LA
6	0,0	0,0	LA
7	0,0	0,0	LA
8	0,0	0,0	LA

Quadro 5.5 - Resultados dos ensaios de pastilha na amostra 30/70.

30%Solo 70%Cinza			
Teor de Cal	Penetração (mm)	Contração	Classificação
1	6,3	0,0	NA-NS'
2	6,1	0,0	NA-NS'
3	5,9	0,0	NA-NS'
4	4,5	0,0	NA-NS'
5	4,4	0,0	NA-NS'
6	0,4	0,0	LA

Quadro 5.6 - Resultados dos ensaios de pastilha na amostra 50/50.

50%Solo 50%Cinza			
Teor de Cal	Penetração (mm)	Contração	Classificação
2	3,0	0,0	NA
3	0,0	0,0	LA
4	0,0	0,0	LA
5	0,0	0,0	LA

Quadro 5.7 - Resultados dos ensaios de pastilha na amostra 70/30.

70%Solo 30%Cinza			
Teor de Cal	Penetração (mm)	Contração	Classificação
2	2,3	0,0	NA
3	0,8	0,0	NA
4	0,1	0,0	LA
5	0,2	0,0	LA

Quadro 5.8 - Teores de cal para a estabilização das misturas solo/cinza pesada.

Misturas	Teor de cal em peso (%)	Representação
100/0 (solo puro)	4	100/0/4
70/30	4	70/30/4
50/50	3	50/50/3
30/70	6	30/70/6
0/100 (cinza pura)	5	0/100/5

5.1.2.2 Ensaio de compactação

A Figura 5.4 mostra um comparativo entre as curvas de compactação para todas as misturas solo/cinza pesada/cal avaliadas.

Nota-se novamente a influência da cinza na redução da massa específica

aparente seca a medida que aumenta o teor de cinza nas misturas. A influência da cal foi praticamente nula na variação da massa específica aparente seca das misturas.

5.1.2.3 Ensaio de CBR

Nos ensaios de CBR comparou-se corpos-de-prova deixados por um período de cura de 4 e 28 dias, visando detectar o desencadeamento de reações cimentantes que elevassem a resistência das misturas analisadas.

Para um período de 4 dias de cura os corpos-de-prova foram deixados imersos em água e rompidos após esse período. Para 28 dias de cura, os corpos-de-prova foram deixados 24 dias em sacos plásticos em câmara úmida e 4 dias imersos em água, após isso foram rompidos.

As figuras 5.5 e 5.6 mostram um comparativo entre as curvas de CBR e expansão para todas as misturas solo/cinza pesada/cal avaliadas com um período de cura de 4 dias imersos em água.

O Quadro 5.9 mostra um resumo dos ensaios geotécnicos das misturas solo/cinza pesada/cal com um período de cura de 4 dias.

Quadro 5.9 - Resultados dos ensaios geotécnicos das misturas estabilizadas com cal (4 dias de cura) e resultado das misturas sem cal.

Misturas	Teor de Cal (%)	Hot (%)	d s máx (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
Solo Puro (100/0)	4	17,5	1,61	44,9	0,1
	0	19,0	1,71	10,6	3,6
70/30	4	19,0	1,39	42,8	0,0
	0	16,7	1,59	19,2	0,6
50/50	3	28,0	1,22	35,7	0,0
	0	22,6	1,37	22,6	0,0
30/70	6	33,0	1,05	28,1	0,0
	0	27,0	1,30	18,8	0,0
Cinza Pura (0/100)	5	43,3	0,88	24,6	0,0
	0	42,0	0,95	5,0	0,0

Analisando-se os resultados do Quadro 5.9, observa-se que a adição de 3 a 4% de cal nas misturas propicia, mesmo apenas aos 4 dias de cura, um substancial aumento no valor de CBR de todas as misturas.

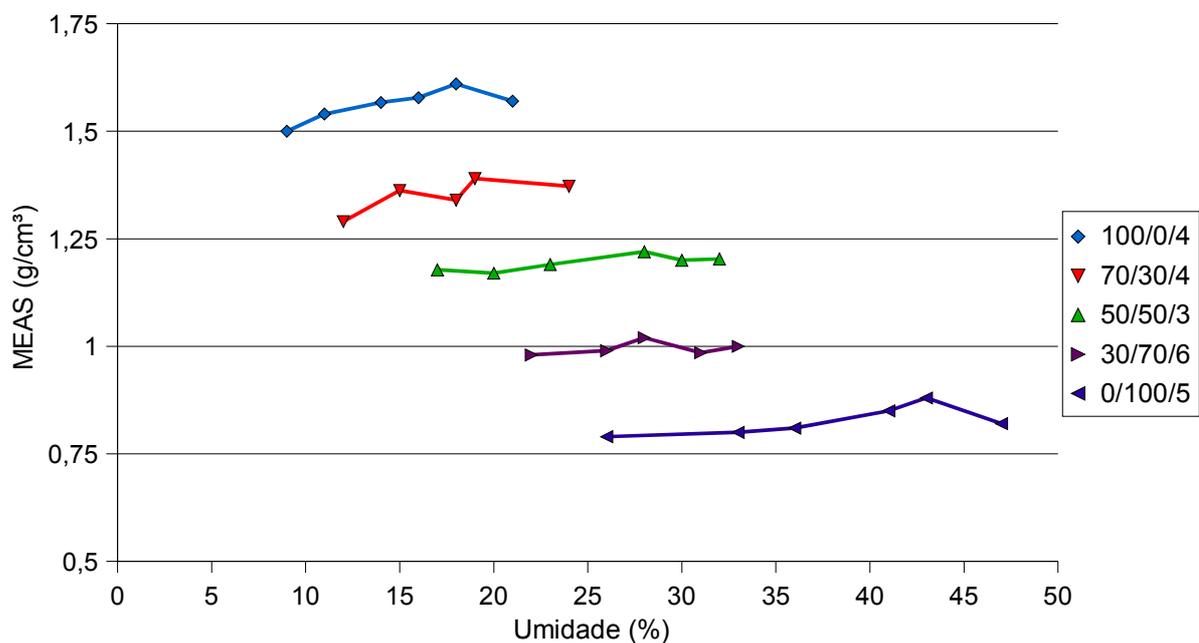


Figura 5.4 - Curvas de compactação das misturas solo/cinza pesada/cal.

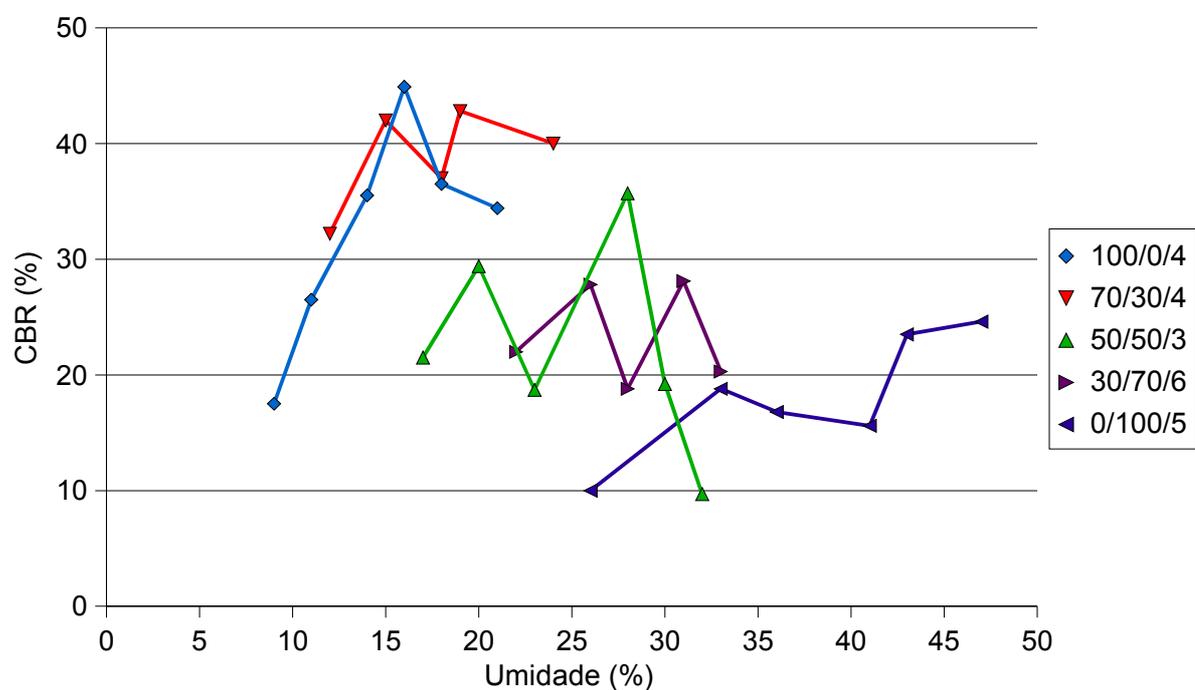


Figura 5.5 - Curvas de CBR das misturas solo/cinza pesada/cal (cura de 4 dias).

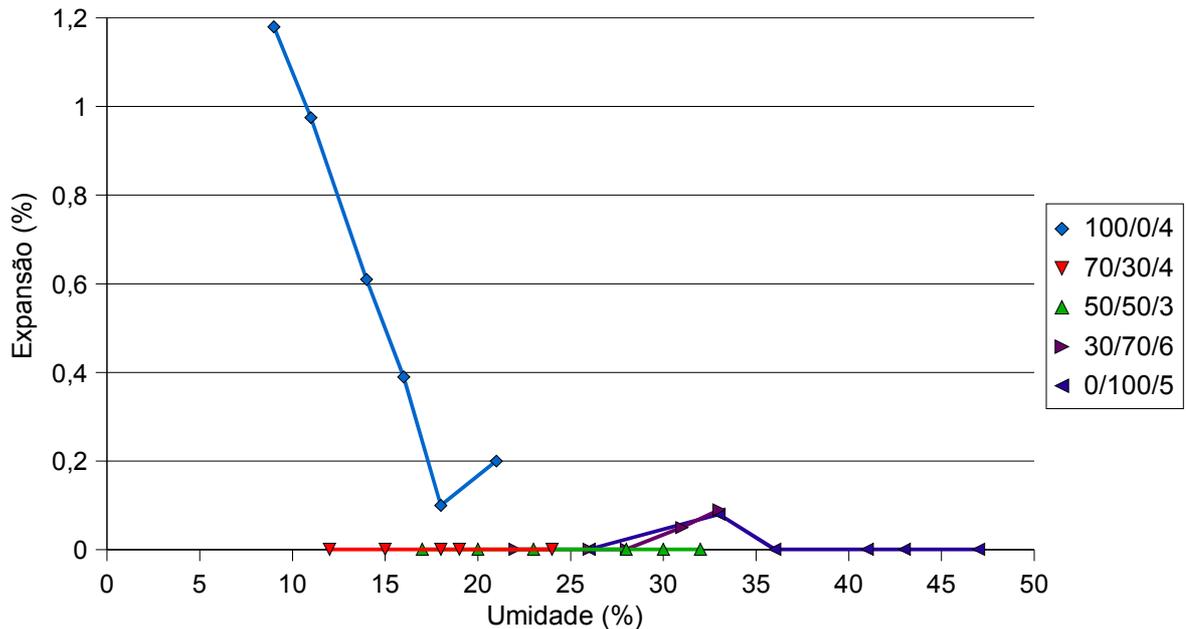


Figura 5.6 - Curvas de expansão das misturas solo/cinza pesada/cal (cura de 4 dias).

Com relação a umidade ótima, somente quando o solo foi analisado isoladamente ocorreu a redução, nas demais misturas ocorreram um aumento. Em todos os casos, a adição de cal causou uma redução da massa específica aparente seca das misturas solo/cinza pesada.

O Quadro 5.10 apresenta os resultados de CBR das misturas ensaiadas (com e sem cal) aos 4 e 28 dias. A análise comparativa entre a variação do CBR provocada por um período de cura de 4 dias nas amostras não estabilizadas com cal, possibilita dizer que, somente a adição de cinza pesada não provoca reações cimentantes na mistura, neste curto espaço de tempo, pois não foram detectadas alterações significativas nos valores de CBR.

Nas misturas solo/cinza pesada/cal deixadas por um período de cura de 28 dias (Quadro 5.10), verificou-se um ganho de resistência muito significativo e que na mistura 70/30/4 superou os 100% de aumento, como ilustra a Figura 5.7. Com 28 dias de cura, os CBR's aumentaram cerca de 200% (passaram de valores em torno de 20% para valores em torno de 60%, com exceção da mistura 0/100/5 (cinza pura estabilizada com cal), em que o CBR aumentou cerca de 550%, passando de 5,8% para valores em torno de 40%.

5.1.3 Avaliação do comportamento resiliente

Os ensaios de resiliência foram realizados no Laboratório de pavimentação da UFRGS. Os resultados obtidos indicam que o solo empregado na pesquisa é classificado como de comportamento granular (dependente da pressão de confinamento) e pertencente ao Grupo A (PINTO e PREUSSLER, 2001).

Solos enquadrados neste grupo apresentam um elevado grau de resiliência e se constituem em um material de péssimo desempenho em camadas de reforço do subleito e camada final de terraplenagem.

Entretanto, os ensaios realizados mostram que o módulo resiliente é pouco sensível à pressão de confinamento e para baixos níveis de pressão de confinamento ($<0,2 \text{ kgf/cm}^2$ ou $19,61 \text{ KPa}$) ele tende a apresentar um comportamento dos materiais do Grupo B, o que pode torná-lo interessante para aplicação em camada final de terraplenagem, porém não sendo indicado para camada de reforço. A Figura 5.8 apresenta os resultados obtidos para o solo.

Por sua vez, os resultados obtidos para a cinza pesada indicam que ela possui um comportamento de material granular, porém com elevado grau de resiliência (Grupo A da classificação), maior do que o do solo estudado.

O módulo resiliente da cinza pesada é muito dependente da pressão de confinamento e os valores são muito baixos, o que levaria a um comportamento extremamente ruim como material de camada final de terraplenagem. A Figura 5.9 apresenta os resultados obtidos para a cinza.

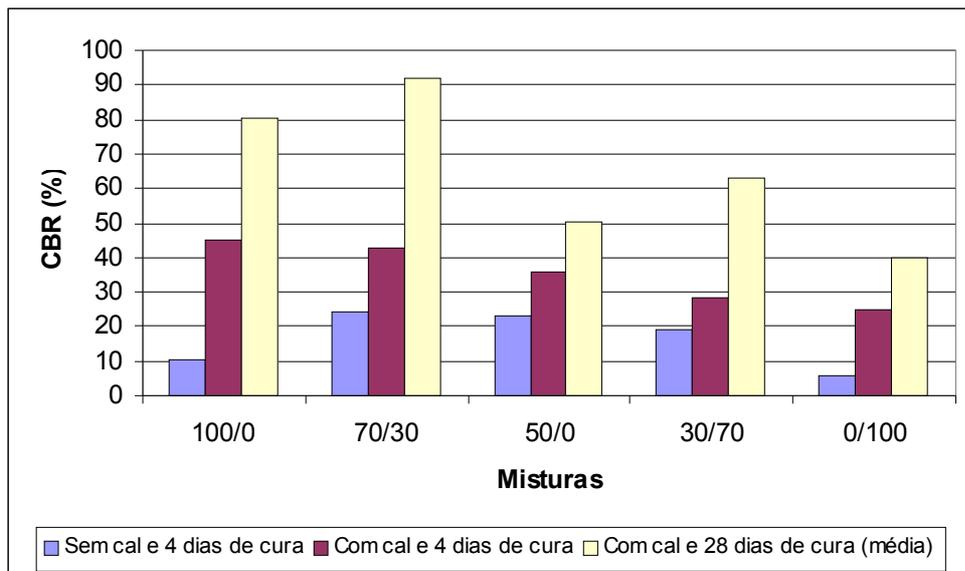


Figura 5.7 - Variação do CBR com a adição de cal para as misturas solo/cinza pesada.

Quadro 5.10 - Resultados dos ensaios de CBR para as diferentes misturas ensaiadas

solo/cinza pesada	4 dias (sem cal)			4 dias (com cal)			28 dias (com cal)		
	CBR (%)	δs máx (g/cm ³)	H _{cp} (%)	CBR (%)	δs máx (g/cm ³)	H _{cp} (%)	CBR (%)	δs máx (g/cm ³)	H _{cp} (%)
100/0	10,6	1,71	19,0	44,9	1,61	17,5	62,8	1,65	15,0
							83,5	1,65	16,8
							94,2	1,65	16,4
70/30	24,2	1,40	23,0	42,8	1,39	19,0	89,3	1,39	17,4
							97,1	1,39	17,0
							89,6	1,38	18,4
50/50	23,2	1,23	24,0	35,7	1,22	28,0	53,6	1,24	24,58
							66,7	1,23	25,64
							30,9	1,18	25,38
30/70	18,8	1,07	27,0	28,1	1,05	33,0	72,3	1,06	27,51
							67,7	1,07	26,60
							49,0	1,06	28,83
0/100	5,9	0,83	42,0	24,6	0,88	43,3	39,2	0,89	54,59
							40,3	0,88	51,09
							40,5	0,86	47,34

H_{cp}: Umidade de Compactação

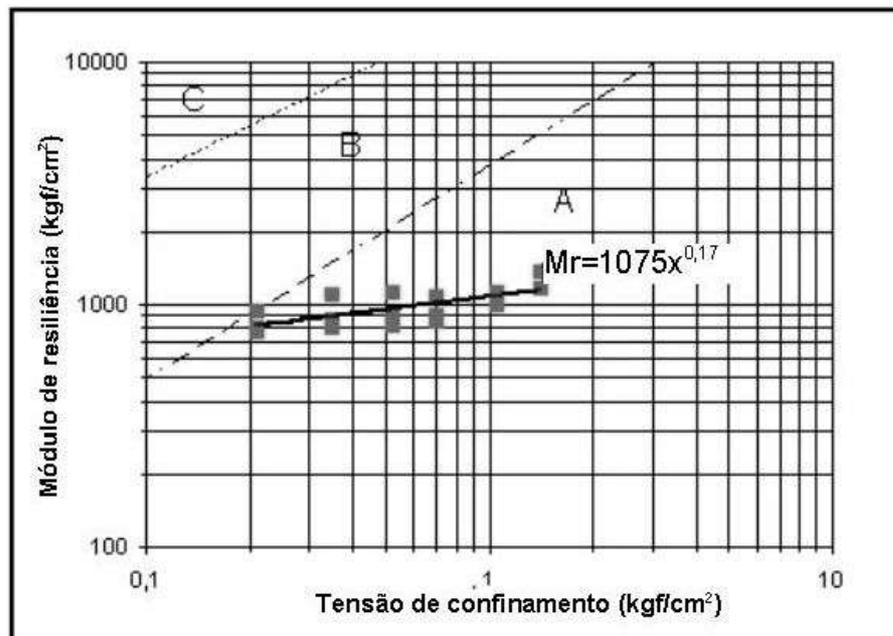


Figura 5.8 - Comportamento resiliente do solo estudado.

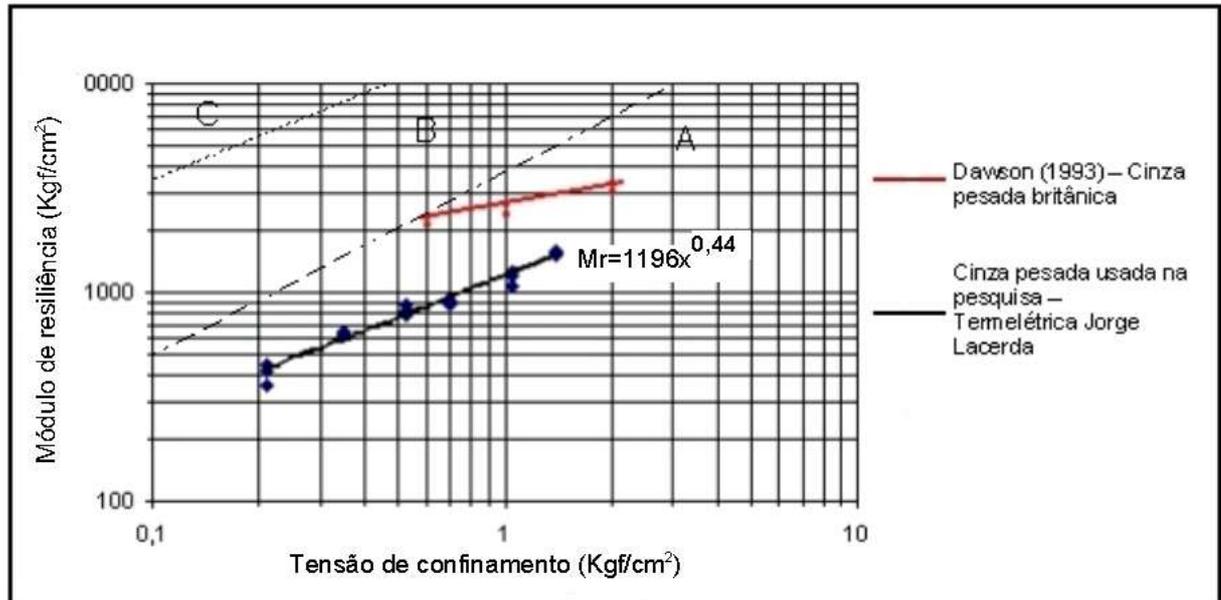


Figura 5.9 - Comportamento resiliente da cinza.

Plotou-se na Figura 5.9 (curva vermelha) o comportamento resiliente da cinza pesada gerada nas Termelétricas britânicas, diagnosticado por DAWSON et al (1993, p. 1001). Destaca-se que a granulometria é mais grosseira (ver Figura 4.2) em relação a cinza pesada analisada na pesquisa. Ambas têm comportamento de material granular e pela classificação resiliente (PINTO e PREUSSLER, 2001) a cinza britânica aproxima-se mais do grupo B, e pode ser avaliada quanto ao empregado em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis.

Visando detectar quais as alterações seriam provocadas no comportamento dinâmico na mistura solo/cinza pesada, realizou-se o ensaio de resiliência na mistura 70/30. A escolha dessa mistura foi em função da mesma apresentar os melhores resultados de CBR com medida de expansão e, portanto, com melhor potencial para emprego na pavimentação. Os resultados obtidos indicam que a adição de cinza não apresentou melhora no comportamento resiliente do solo, que se enquadra no Grupo A, ou seja, com elevado grau de resiliência e não indicado para camada final de terraplenagem. A Figura 5.10 apresenta o resultado do ensaio.

Por outro lado, os ensaios dinâmicos das misturas solo/cinza pesada/cal mostraram que a cal propicia uma melhora significativa no comportamento resiliente, mesmo com poucos dias de cura.

A mistura 70/30, estabilizada com 4% de cal (70/30/4) e com 15 dias de cura, apresentou um comportamento resiliente enquadrado no Grupo B, podendo ser empregada em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis.

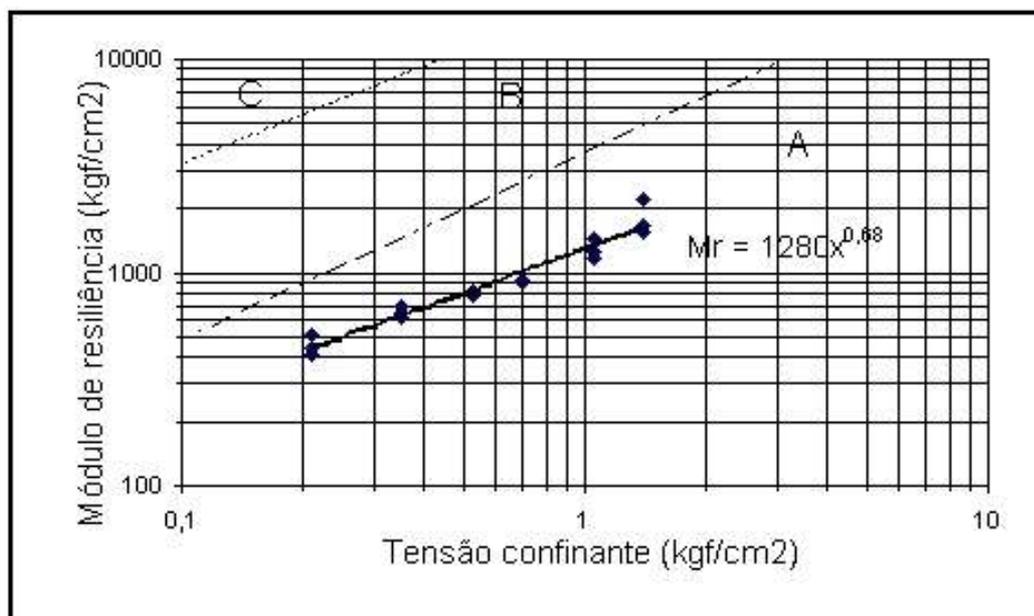


Figura 5.10 - Comportamento resiliente da mistura 70/30.

A mistura 50/50 estabilizada com 3% de cal (50/50/3) e também com 15 dias de cura, apresentou um comportamento resiliente superior ao da mistura 70/30/4. As Figuras 5.11 e 5.12 mostram os resultados obtidos.

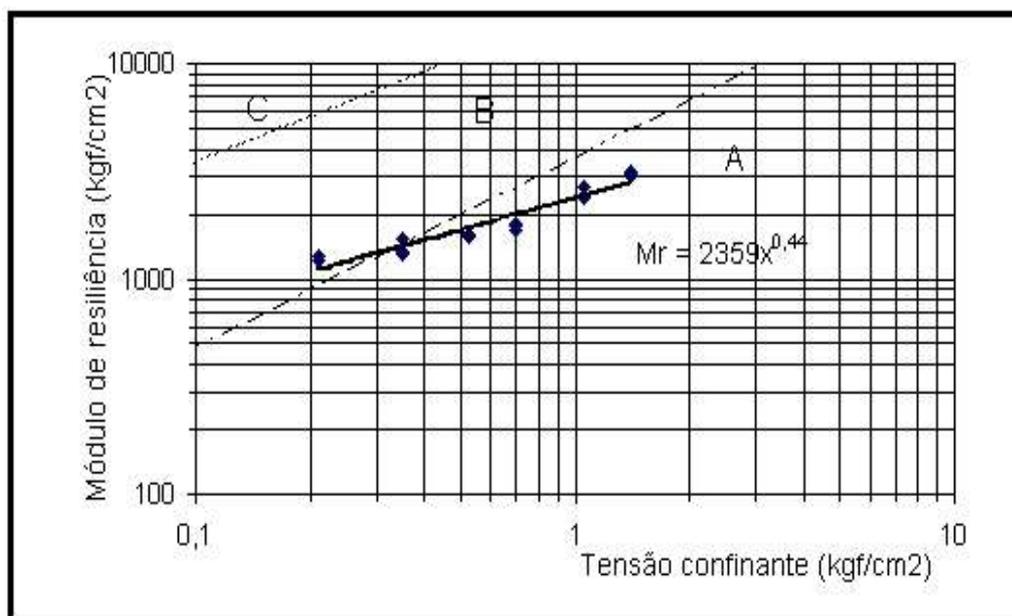


Figura 5.11 - Comportamento Resiliente da mistura solo/cinza pesada/cal (70/30/4).

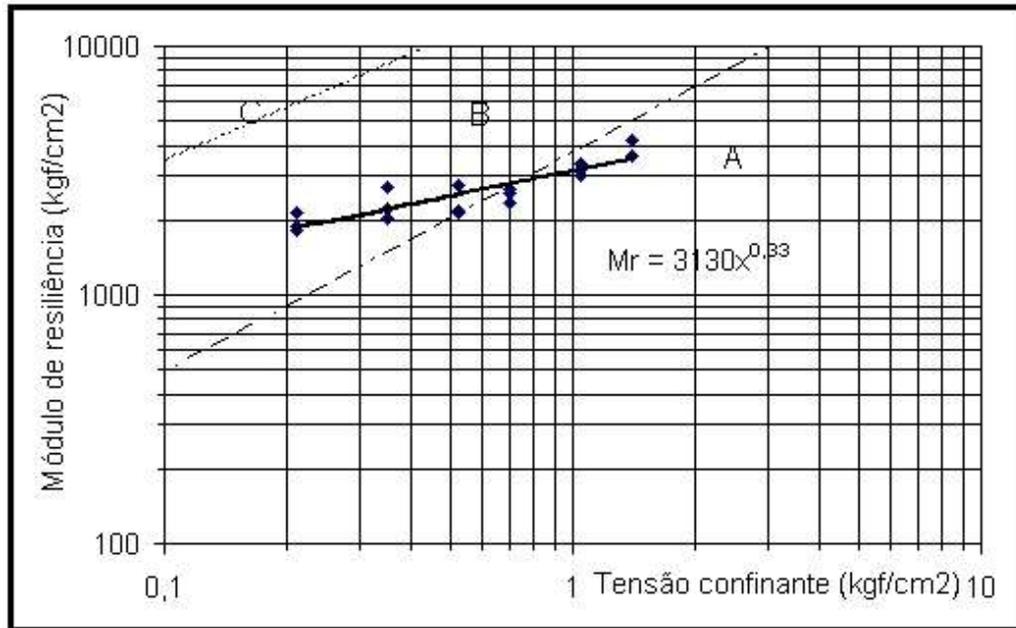


Figura 5.12 - Comportamento Resiliente da mistura solo/cinza pesada/cal (50/50/3).

Os resultados dos ensaios de CBR e comportamento dinâmico indicaram que as misturas solo/cinza pesada/cal podem ser empregadas em camada de sub-base de pavimentos.

5.1.4 Ensaios de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples, foram realizados visando um possível uso do material como base de pavimentos. Nessas condições, a camada de base deve ter uma resistência à compressão mínima. Foram realizadas duas baterias de ensaios de compressão simples. Na primeira, os ensaios foram realizados em corpos de prova moldados com solo puro e em duas misturas solo/cinza pesada (70/30 e 50/50). O objetivo foi verificar a influência da adição de cinza na resistência à compressão do solo.

Na segunda, foram moldadas duas séries de corpos-de-prova, com diversas misturas solo/cinza pesada estabilizadas e não estabilizadas com cal.

5.1.4.1 A influência da cinza na resistência à compressão

A Figura 5.13 mostra a variação da resistência à compressão simples com a idade do solo e das duas misturas solo/cinza pesada. Como pode ser observada na Figura 5.13, a resistência máxima alcançada gira em torno de $5,0\text{kgf/cm}^2$ ($490,33\text{ Kpa}$), que é um valor baixo para que as misturas possam ser empregadas em camadas de base de pavimentos.

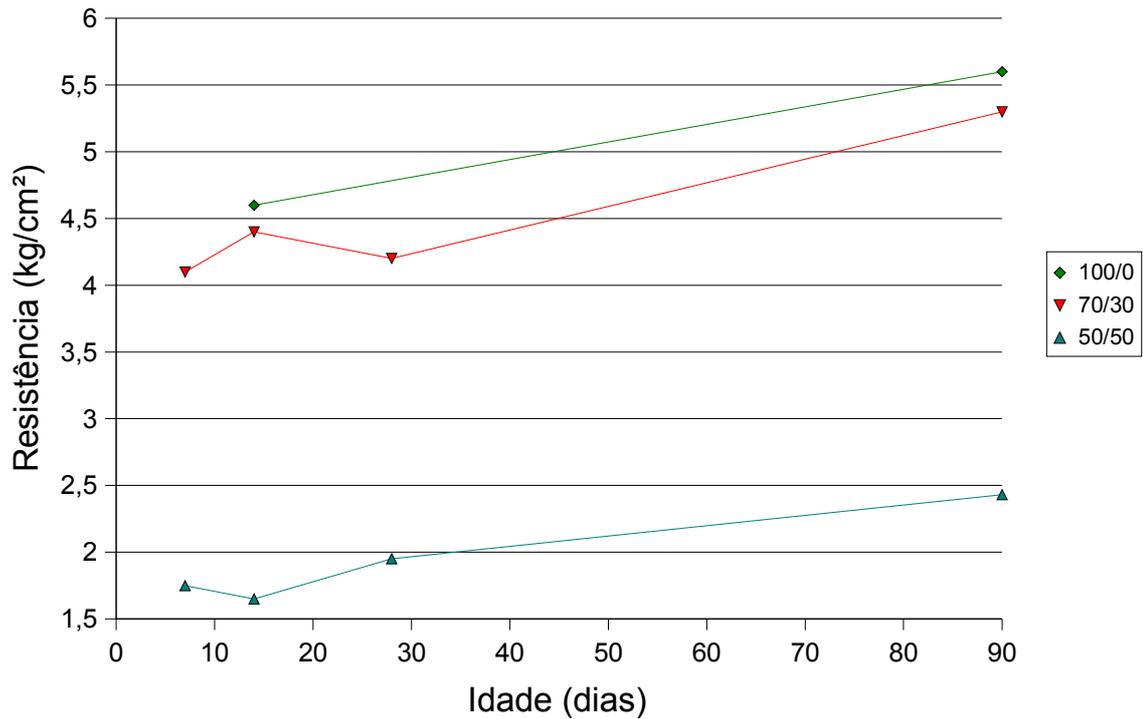


Figura 5.13 - Variação da resistência à compressão simples com a idade.

5.1.4.2 A influência da cal na resistência à compressão

O Quadro 5.11 e a Figura 5.14 apresentam os resultados de resistência à compressão simples nas misturas solo/cinza pesada e solo/cinza pesada/cal estudadas em diferentes períodos de cura.

Nota-se através da Figura 5.14 que para todas as misturas os valores de resistência à compressão aumentaram ao longo do tempo, porém não atingem resistência suficiente para possibilitar o emprego das misturas solo/cinza pesada/cal em camadas de base. (Necessário alcançar no mínimo 2,1 Mpa aos 7 dias).

Quadro 5.11 - Resistência à compressão simples das misturas ensaiadas.

Solo/ cinza	4 dias (sem cal)			4 dias (com cal)			28 dias (com cal)		
	Resist. (kgf/cm ²)	δs máx (g/cm ³)	H _{cp} (%)	Resist. (kgf/cm ²)	δs máx (g/cm ³)	H _{cp} (%)	Resist. (kgf/cm ²)	δs máx (g/cm ³)	H _{cp} (%)
100/0	6,71	1,61	15,6	8,56	1,61	16,0	9,27	1,61	15,4
	7,27	1,60	15,9	8,44	1,61	15,0	8,69	1,61	15,7
	8,12	1,60	15,5	9,01	1,61	16,0	10,65	1,60	15,8
70/30	5,77	1,42	16,8	10,70	1,41	18,0	9,13	1,40	15,7
	8,69	1,44	15,5	7,70	1,41	17,0	8,81	1,40	16,3
	7,53	1,41	16,0	6,28	1,40	16,0	9,21	1,40	15,5
50/50	5,85	1,27	21,5	6,02	1,26	24,0	7,98	1,25	22,7
	5,25	1,28	22,4	5,94	1,26	24,0	8,03	1,25	22,0
	5,08	1,28	22,6	8,00	1,27	24,0	7,79	1,24	22,0
30/70	3,53	1,10	28,2	5,94	1,10	28,0	6,31	1,10	25,8
	3,67	1,09	29,5	4,91	1,11	26,0	6,53	1,09	25,3
	3,01	1,10	25,8	5,42	1,10	28,0	6,04	1,10	25,4
0/100	1,70	0,91	35,2	2,71	0,91	37,0	7,04	0,92	34,1
	1,64	0,92	36,4	2,84	0,91	36,0	5,87	0,92	32,6
	2,30	0,98	29,0	2,14	0,89	37,0	7,89	0,91	36,8
							10,43	0,91	35,5

Resist= Resistência à compressão. H_{cp}= Umidade de Compactação.

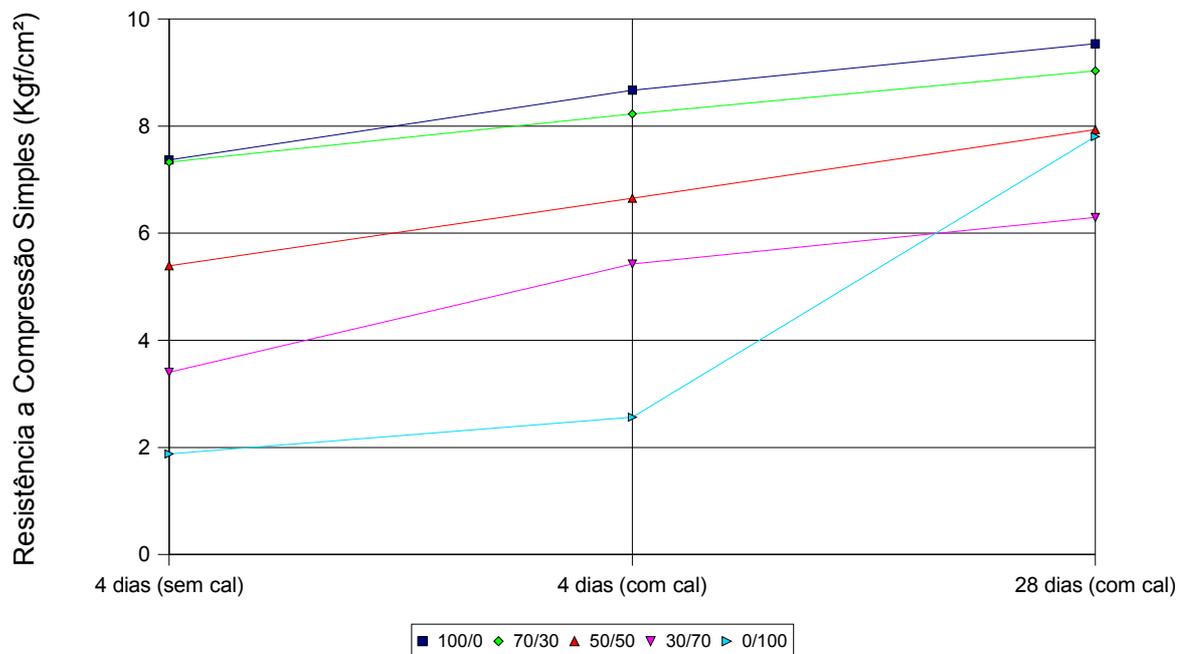


Figura 5.14 - Variação da resistência a compressão das misturas solo/cinza pesada/cal

5.1.5 Discussão dos resultados obtidos para o comportamento mecânico

Os resultados obtidos permitem concluir que o solo estudado é do tipo A-5 do sistema HRB de classificação e comportamento não laterítico argiloso (NG´) pela classificação MCT, com capacidade de suporte (CBR) variando de 5,9% a 10,6% e, devido à expansibilidade, que atingiu valores de 2,71 a 3,5%, não poderia ser empregado em uma camada reforço de subleito ou mesmo numa camada final de terraplenagem. O comportamento dinâmico, apresentou um elevado grau de resiliência e módulo pouco susceptível a tensão de confinamento, sendo que, em rodovias de baixo volume de tráfego e submetido a condições de tensão de confinamento inferiores a 0,2 kgf/cm² (19,61KPa), o material poderia ser empregado como camada final de terraplenagem.

O teor de cal necessário para estabilizar o solo foi de 4,0% e depois de estabilizado, este apresentou um aumento significativo no valor de CBR, baixa expansão e um aumento significativo na resistência com o tempo.

Em relação à cinza, os resultados mostram que com o “destorroamento” há uma significativa mudança nas porcentagens de silte e areia da cinza, indicando um “afinamento” da granulometria, o que é demonstrado pela diminuição do módulo de finura. Em estudos de estabilização, tal comportamento é interessante pois quanto mais fino o material maior é a atividade pozolânica e, com isso, maior seria o potencial de estabilização. Porém, os resultados apontaram para uma pequena, ou quase nula atividade pozolânica da cinza pesada.

A adição de cinza no solo, nas proporções estudadas, demonstra que há uma estabilização granulométrica do material, melhorando significativamente o comportamento geotécnico resultante, no que diz respeito ao CBR e Expansão.

Considerando os valores de capacidade de suporte (CBR) das misturas 70/30 e 50/50, que foram superiores a 20%, elas poderiam ser empregadas em camadas de sub-base, segundo a metodologia do DNER (1979),

A cinza pesada apresenta um péssimo comportamento resiliente (classificada no Grupo A) e também não melhora o comportamento dinâmico do solo, como era de se esperar (melhora na granulometria da mistura, porém diminui a sua massa específica).

A adição de cal nas misturas melhora consideravelmente o comportamento geotécnico dos materiais, sendo que os valores de CBR, em todas as misturas solo/cinza pesada estudadas superaram a 25%, com 4 dias de cura, e a

50% com 28 dias de cura. O maior valor alcançado foi de 97,1% como a mistura 70/30 estabilizada com 4,0% de cal.

O comportamento dinâmico das amostras 70/30 estabilizada com 4,0% de cal e 50/50 estabilizada com 3,0%, ambas com período de 15 dias de cura, foram de materiais classificados como tipo B, sendo recomendado sua aplicação em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis (PREUSSLER e PINTO, 2001).

5.2 Análise das Interações Ambientais

Na análise ambiental os materiais e misturas passaram por uma classificação quanto à periculosidade, sendo determinada a composição química e realizados ensaios tradicionais de lixiviação e solubilização.

Posteriormente, os materiais e misturas foram submetidos à percolação de uma solução preparada com a característica físico-química similar a da chuva, determinada a partir das características da chuva na região de Tubarão. Os corpos-de-prova submetidos ao ensaio foram moldados em condições de umidade e compactação similares as que seriam utilizados na estrutura do pavimento. O líquido percolado foi analisado quimicamente quanto a parâmetros predefinidos visando detectar a concentração dos elementos químicos que seriam lançadas ao ambiente após a percolação da água na camada do pavimento (sub-base ou reforço) onde seria utilizado o material.

Para caracterização química dos materiais foram realizados os seguintes ensaios:

- Avaliação da composição dos materiais;
- Ensaios de lixiviação e solubilização; e,
- Classificação dos materiais como resíduos sólidos.

Os ensaios foram realizados pelo Laboratório da Greenlab Análises Químicas e Toxiológicas, Porto Alegre – RS e os laudos emitidos são apresentados no Anexo 3.

Os ensaios foram conduzidos de maneira a diagnosticar quais os elementos químicos perigosos existem na cinza pesada, sua classificação quanto à NBR 10004/87 – Resíduos Sólidos – Classificação, e as concentrações lixiviadas e solubilizadas.

Com o objetivo de verificar as alterações nos parâmetros do ensaio, também realizou-se a mesma seqüência de ensaios em uma amostra de solo e cinza.

Assim, foram preparadas duas amostras para a caracterização química quanto à periculosidade, 0/100 e 50/50.

5.2.1 Composição química dos materiais

Esse ensaio visou somente detectar a composição química dos elementos de interesse para a classificação do material quanto a sua periculosidade para disposição no solo, não sendo obtida a composição para todos os elementos, mas somente para aqueles de interesse para a norma (NBR –10004/87 – Resíduos sólidos – Classificação). Os resultados dos ensaios de composição química são apresentados no Quadro 5.12.

Quadro 5.12 - Composição químicas das amostras analisadas (elementos perigosos)

Parâmetros	Amostra	
	50/50	0/100
Arsênio (mg As/Kg)	4,54	0,94
Chumbo (mg Pb/Kg)	30,6	1,29
Cianeto (mg CN ⁻ /Kg)	0,45	0,61
Cromo (mg Cr/Kg)	4,14	6,35
Fenol (mg Fenol/Kg)	n.d.	n.d.
Matéria Orgânica (%)	2,00	1,09
Mercúrio (mg Hg/Kg)	2,15	1,13
pH 10%	6,8	6,6
Selênio (mg Se/Kg)	0,36	0,15
Sulfeto (mg S ⁻² /Kg)	n.d.	n.d.
Umidade (%)	15,9	28,9
Vanádio (mg V/Kg)	214	3,27

5.2.2 Classificação quanto à Periculosidade

De acordo com os laudos fornecidos, a cinza pesada ensaiada não é corrosiva, não é inflamável e não reage violentamente quando adicionada à água. Tanto a cinza pesada quanto a mistura solo/cinza pesada enquadraram-se na classe II, sendo então um resíduo não inerte e não perigoso.

As concentrações dos elementos químicos perigosos obtidas na composição dos materiais analisados foram comparadas com valores de referência e de alerta para qualidade de solos (CASARINI, 2001), na Figura 5.15, e com os limites acima dos quais os materiais seriam considerados resíduos perigosos segundo a NBR-10.004 Resíduos sólidos – Classificação (ABNT, 1987), na Figura 5.16.

Analisando-se a Figura 5.15, destaca-se na composição química da cinza

(0/100) e da mistura 50/50 os valores de Mercúrio bem superiores aos valores de referência e alerta para qualidade de solos. Nota-se que na mistura 50/50 o valor foi superior ao valor da cinza pura (0/100). Também destaca-se a superioridade das concentrações de Chumbo e Arsênio na mistura 50/50 em relação ao valor de referência. Tais elementos deverão ser monitorados nos ensaios de percolação.

Nota-se na Figura 5.16 que todos as concentrações para todos os elementos ficaram abaixo dos limites para resíduos classificados como perigosos, ou seja, classe I.

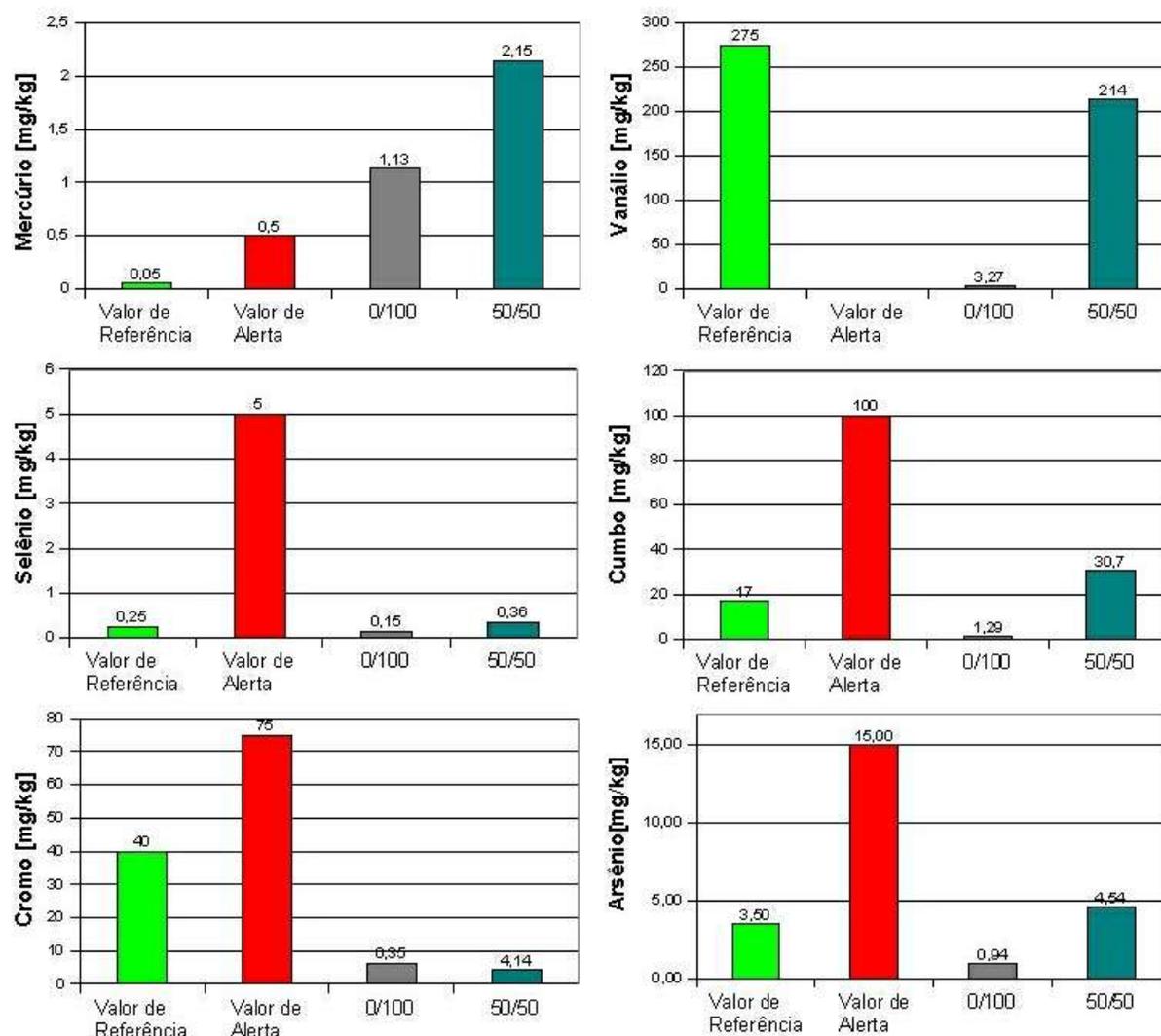


Figura 5.15 - Comparação das composições das amostras analisadas e os valores de referência.

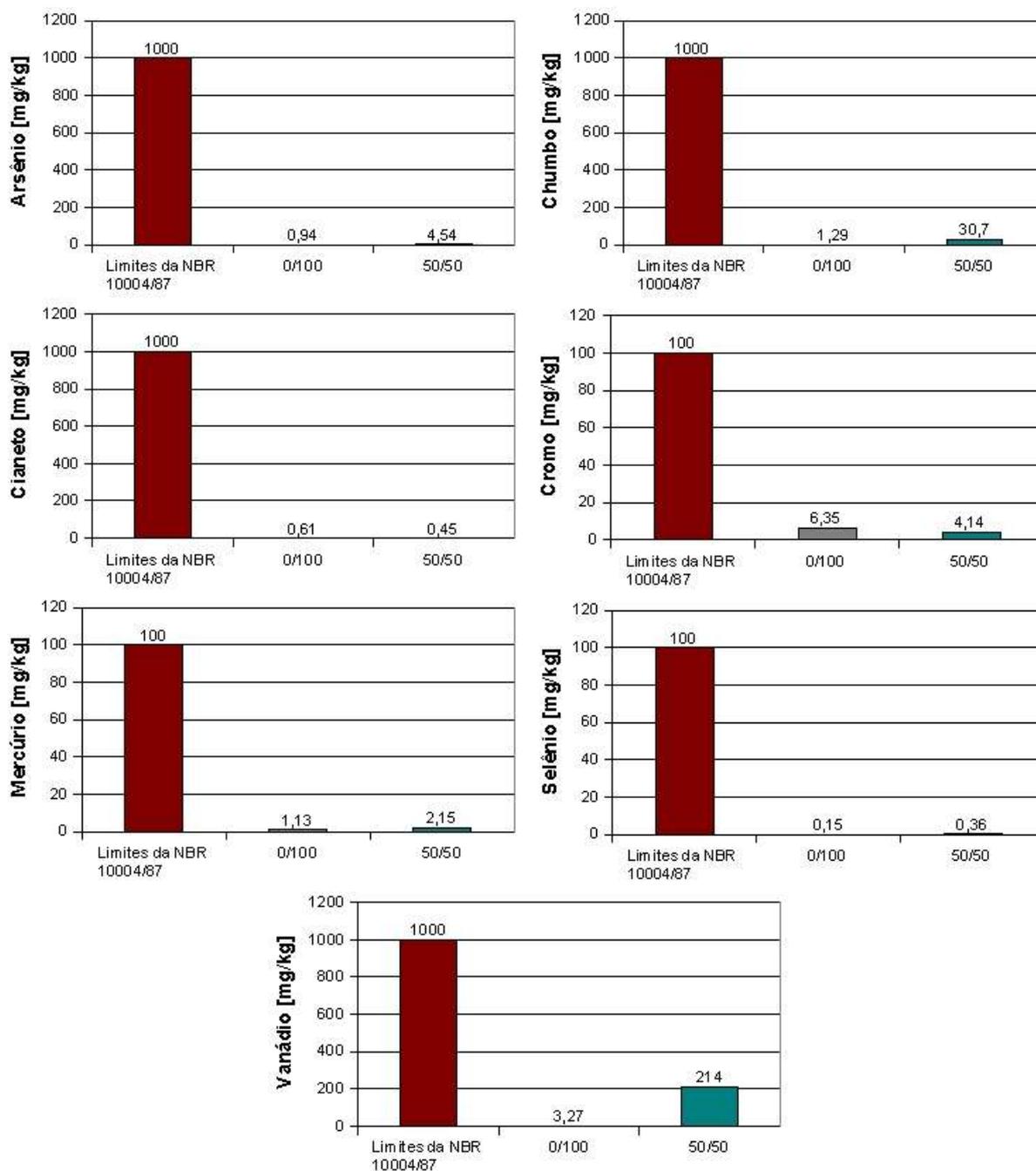


Figura 5.16 - Concentrações das substâncias da listagem 9 da NBR 10004 e as concentrações presentes nas amostras analisadas.

5.2.3 Ensaio de lixiviação

Os resultados dos ensaios de lixiviação (ABNT, 1987) foram comparados com o padrão de potabilidade estabelecido pelo Ministério da Saúde na Portaria 1469 de 29 de dezembro de 2000 (Figura 5.17), que servem de referência para a CETESB no controle da qualidade da água subterrânea no estado de São Paulo, e com os limites da NBR 10004/87, cujo resultado é apresentado na Figura 5.18.

Nota-se na Figura 5.18 que para os elementos de interesse para a NBR-10004/87, todos os valores ficaram acima dos padrões de potabilidade. Apesar do resultado do ensaio de lixiviação estar acima do padrão de potabilidade, os valores ficaram bem abaixo dos limites para resíduos perigosos ou Classe I, como pode ser visto na Figura 5.18.

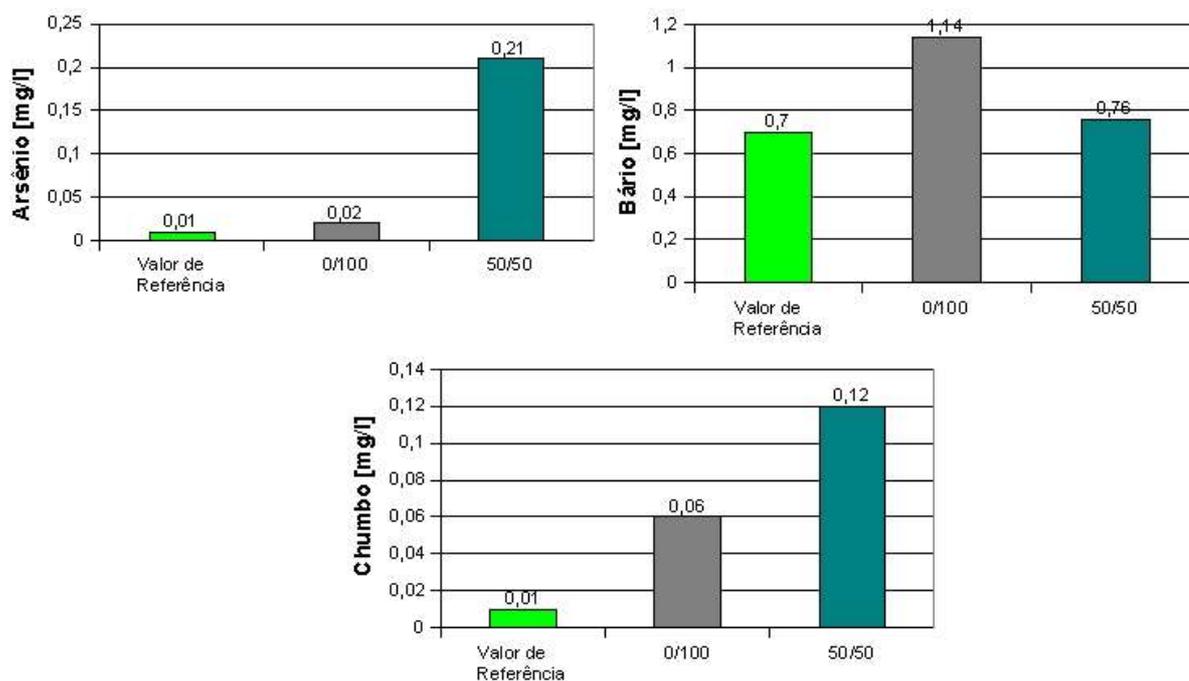


Figura 5.17 - Ensaio de lixiviação e os valores de intervenção para qualidade de águas subterrâneas.

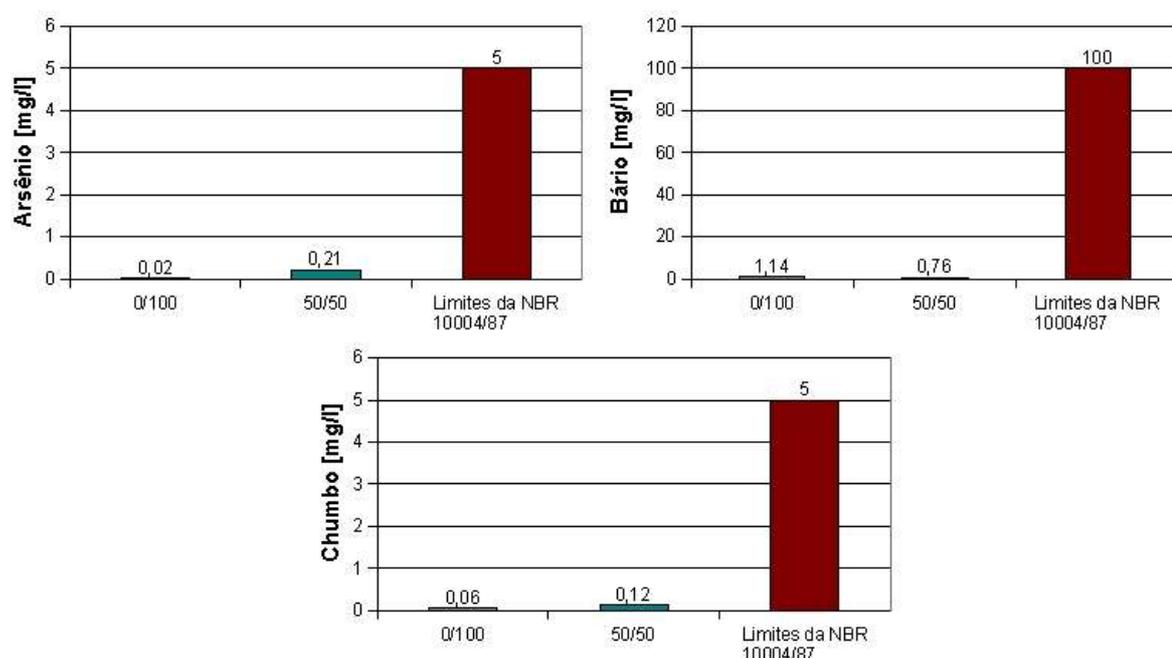


Figura 5.18 - Ensaio de lixiviação e os limites da Listagem 7 da NBR 10004.

5.2.4 Ensaio de solubilização

Da mesma forma como procedido com os ensaios de lixiviação, também comparou-se os resultados dos ensaios de solubilização com os padrões de qualidade pré-estabelecidos.

Dessa forma, comparou-se as concentrações dos elementos químicos perigosos detectadas no ensaio solubilização com valores de intervenção para qualidade de águas subterrâneas pela CETESB no estado de São Paulo (Figura 5.19) e com os limites, para resíduos considerados inertes da NBR 10004 – Resíduos sólidos classificação (1987), apresentados na Figura 5.20.

Analisando-se a Figura 5.19, nota-se que os resultados dos ensaios de solubilização apresentaram concentrações próximas aos padrões de potabilidade, adotados como padrões de qualidade para água subterrânea pela CETESB. Os valores mais distantes desses valores foram para o Manganês e o Ferro. Para o Manganês, o resultado do ensaio com a mistura 50/50 foi 3,5 vezes maior do que o padrão de potabilidade, sendo que na amostra 0/100 foi 1,8 vezes maior. Para o Ferro o resultado do ensaio na mistura 50/50 foi 1,4 vezes maior, e na mistura 0/100 foi 1,3 vezes maior.

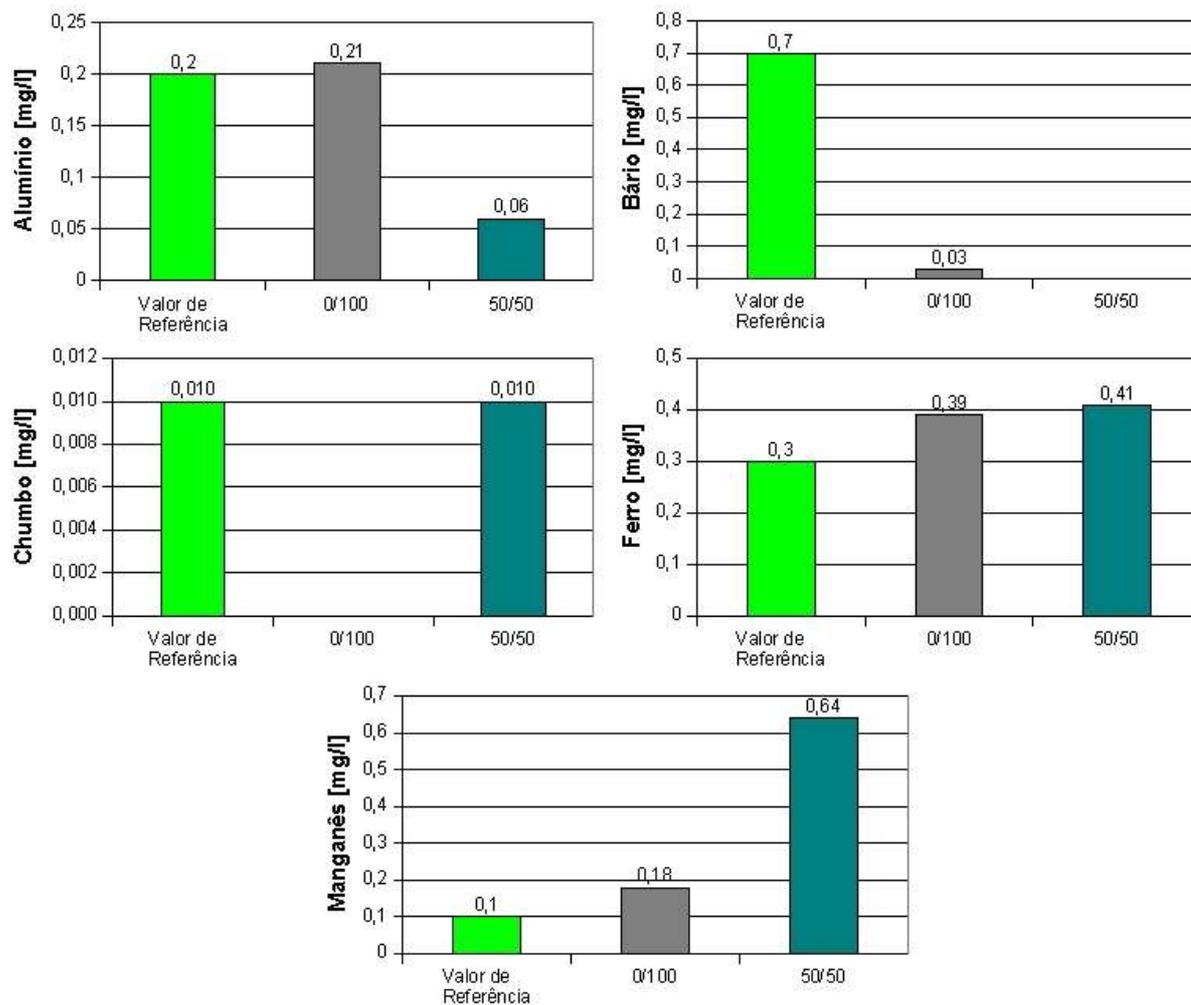


Figura 5.19 - Ensaio de solubilização e valores de referência para qualidade de águas subterrâneas.

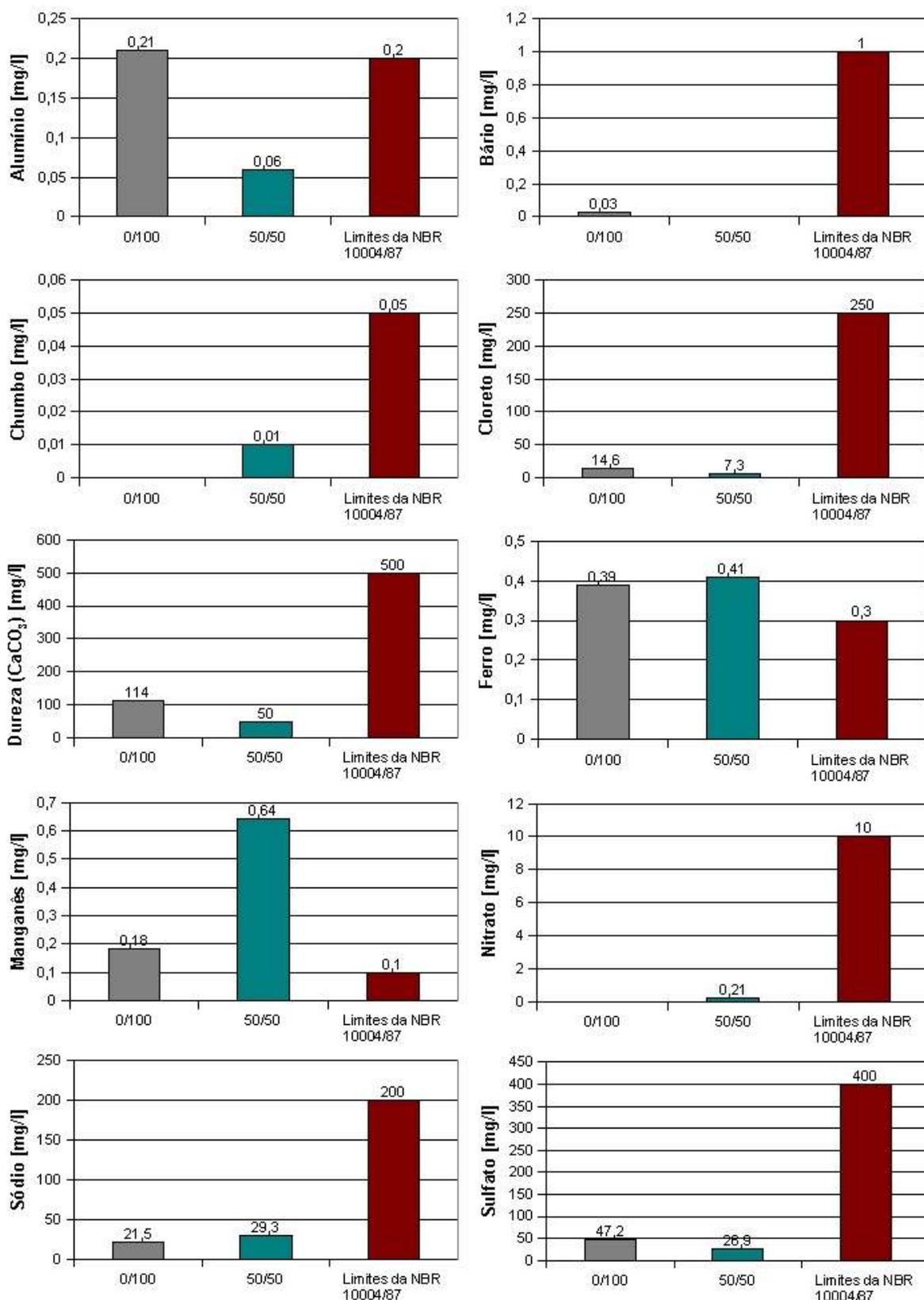


Figura 5.20 - Ensaio de solubilização e os limites da Listagem 8 da NBR 10004.

Na Figura 5.20 pode-se observar as razões que levaram a classificação das amostras 0/100 e 50/50, segundo a NBR-10004/87, como Resíduos Sólidos

Classe II ou não inertes. Os resultados obtidos para os elementos Alumínio, Ferro e Manganês foram superiores aos padrões aceitáveis para resíduos considerados inertes. Destaca-se que nesse ensaio os resultados das amostras ficaram dentro de padrões para resíduos inertes para os elementos químicos Chumbo, Nitrato, Bário e Sódio. Também ficaram dentro desses padrões os Sulfatos, Nitratos e a Dureza.

5.2.5 Ensaio de percolação

Os ensaios visaram analisar a periculosidade do material em condições semelhantes a que serão submetidos na camada do pavimento. Os corpos-de-prova foram compactados nas condições de umidade ótima do Proctor Normal. Todas as amostras foram submetidas as mesmas condições quanto a carga hidráulica e características da solução de percolação.

A planilha de acompanhamento contendo todas as amostras coletadas durante o período de ensaio é apresentada no Anexo 4.

Foram ensaiados corpos-de-prova de solo, cinza pesada e das misturas solo/cinza pesada com melhor desempenho quanto às características geotécnicas. Também foram ensaiadas misturas estabilizadas com cal. A cal tem reconhecida ação estabilizante quanto a incorporação de metais pesados em matrizes cimentadas (ROCCA et al, 1993, p. 89).

Algumas misturas foram mantidas em câmara úmida por um período de 28 dias de cura , afim de verificar variações nos resultados solubilizados, com o desencadear das ações cimentantes. Também foi montada uma célula com 1% de cimento na mistura 50/50 com cal, visando avaliar possíveis alterações nos resultados com a inserção de um percentual de cimento. Dessa forma foram montadas as Células de Percolação, apresentadas no Quadro 5.13.

Análises da permeabilidade nas células durante o período de ensaio Os valores de permeabilidade apresentados foram calculados para cada amostra coletada. Como em cada coleta de amostra da solução percolada a carga hidráulica inicial do ensaio de 20cm sobre o corpo de prova foi repostada, em cada amostra foi aplicada a equação do permeâmetro de carga hidráulica variável (CAPUTO, 1981). Logicamente que ocorreram perdas por evaporação (apesar de tentar-se minimizar esse fenômeno com a colocação de plásticos sobre as células de percolação), porém todas as células estavam submetidas às mesmas condições ambientais, o que de maneira comparativa entre as células reduz a influência desse fenômeno.

Quadro 5.13 - Percentuais em peso dos corpos-de-prova do ensaio de percolação.

Mistura	Solo (%)	Cinza (%)	Cal (%)	Cimento (%)	Tempo de cura (dias)	Denominação
1	100	0	-	-	0	100/0 sem cal
2	100	0	4	-	28	100/0 c/cal 28 dias
3	70	30	4	-	1	70/30 c/cal 1 dias
4	70	30	4	-	28	70/30 c/cal 28 dias
5	70	30	-	-	0	70/30 sem cal
6	50	50	3	-	1	50/50 c/cal 1 dias
7	50	50	3	-	28	50/50 c/cal 28 dias
8	50	50	3	1	28	50/50 c/cal +1% cim 28 dias
9	50	50	-	-	0	70/30 sem cal
10	0	100	5	-	1	0/100 c/cal 1 dia
11	0	100	5	-	28	0/100 c/cal 28 dias
12	0	100	-	-	0	0/100 sem cal

A permeabilidade foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$K = 2,3 \frac{La}{At} \cdot \log\left(\frac{h1}{h2}\right) \quad \text{onde:} \quad (\text{eq. 1})$$

- K - coeficiente de permeabilidade (cm/s);
- L - altura do corpo-de-prova (cm);
- A - seção transversal do corpo-de-prova (cm²);
- t - intervalo de tempo para coleta da amostra (s);
- a - seção transversal onde mede-se a variação da altura na coluna d'água (cm²); e
- $h1$ e $h2$ – alturas inicial e final, respectivamente, da coluna d'água (cm).

Para todas as células verificou-se que, com 95% de confiabilidade, não se pode rejeitar a hipótese de normalidade dos dados de permeabilidade ao longo do período de ensaio.

Esse resultados demonstram que, em termos hidráulicos houve uma homogeneidade do ensaio durante o período de realização dos mesmos, o que reduz as possibilidade de influência dos fatores hidráulicos na variabilidade dos dados de concentração dos elementos lixiviados nas células de percolação. Os valores de permeabilidade obtidos são apresentados no Quadro 5.14.

Quadro 5.14 - Permeabilidade obtida no ensaio de percolação (amostras com N>6).

N	Misturas solo/cinza pesada/cal				
	70/30 sem cal	50/50 sem cal	70/30 com cal	50/50 com cal	50/50 com cal 28 dias
1	1,54E-05	8,02E-06	1,95E-05	1,24E-05	1,42E-05
2	1,66E-05	1,03E-05	1,98E-05	1,27E-05	1,83E-05
3	1,71E-05	1,05E-05	2,00E-05	1,36E-05	2,09E-05
4	1,87E-05	1,26E-05	2,09E-05	1,37E-05	2,66E-05
5	1,93E-05	1,65E-05	2,15E-05	1,46E-05	2,72E-05
6	2,09E-05	2,10E-05	2,34E-05	1,58E-05	2,90E-05
7	2,37E-05		2,35E-05		3,05E-05
8	2,79E-05				
9	3,48E-05				
média	2,16E-05	1,31E-05	2,12E-05	1,38E-05	2,38E-05
desvio padrão	6,30E-06	4,78E-06	1,67E-06	1,25E-06	6,08E-06
CV	29,17	36,49	7,88	9,06	25,55
N	9	6	7	6	7

5.2.5.1 Resultado das análises químicas do líquido percolado

Os parâmetros Alumínio, Ferro, Manganês, pH e acidez, foram analisados sistematicamente em todo o período de ensaio (Anexo 6).

As concentrações obtidas no líquido percolado foram comparados com os padrões de potabilidade da água para consumo humano, estabelecidos pelo Ministério da Saúde na Portaria 1469/2000 (BAUGARTEM e POZZA, 2001), que estava vigente na ocasião da realização dessa pesquisa. Em 25 de março de 2004 foi publicada a Portaria do Ministério da Saúde número 518 que estabeleceu novos valores e revoga as portarias anteriores.

Os resultados das concentrações dos elementos químicos Alumínio, Ferro e Manganês e para o pH e a acidez presentes nas amostras de líquido percolado, estão ilustrados nas Figuras de 5.21 a 5.24, sobre os quais podem ser feitos os seguintes comentários:

- O comportamento dos resultados relacionados às amostras com 30% de cinza ou 50% de cinza foram muitos similares, não havendo relação entre o aumento nas concentrações solubilizadas em virtude do aumento do percentual de cinza na mistura. Em ambas as situações, para todas as células de percolação, as concentrações solubilizadas, não apresentaram uma curva de crescimento ou decréscimo clara no decorrer do período de ensaio;
- As concentrações solubilizadas nas células com solo puro (100/0) e cinza pura

(0/100), tiveram valores muito similares. Somente para o parâmetro Ferro, na célula com cinza pura sem cal, a concentração solubilizada foi maior do que os padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde. Nessa mistura, a concentração foi de 0,47mgFe/l e o padrão de potabilidade para o Ferro é de 0,30 mgFe/l;

- A solubilização do elemento químico manganês ficou abaixo do limite de detecção em todas as amostras analisadas, resultado antagônico em comparação com o ensaio de solubilização realizado, pela metodologia proposta a NBR 10004/87, onde esse elemento químico foi um dos responsáveis pela classificação da cinza pesada (0/100) e da mistura solo/cinza pesada (50/50) como materiais não inertes;
- Em relação ao elemento químico Ferro, a adição de cal fez com que 100% das amostras, após eliminação de valores espúrios, ficassem dentro dos padrões de potabilidade. Nas misturas sem cal, de um total de 19 amostras coletadas, apenas 9 ficaram acima dos padrões de potabilidade e em 13 amostras esse elemento foi detectado;
- Em relação ao elemento químico alumínio, nas misturas sem cal, das 19 amostras analisadas, em somente 2 os valores ficaram acima dos padrões de potabilidade e em somente 3 ficaram acima dos limites de detecção do ensaio. Com a adição de cal, as taxas de solubilização do alumínio foram maiores ficando acima dos padrões de potabilidade em 100% das amostras. Esse comportamento também foi o mesmo nas amostras de percolado coletadas nos corpos-de-prova moldados com cinza pura e solo puro estabilizados com cal;
- Em relação a acidez, os valores médios nas misturas 70/30 e 50/50 sem cal foram de 22 mgCaCO₃/l, sendo que, na amostra de cinza pura, esse valor ficou abaixo do limite de detecção. Com a adição de cal em 100% das amostras os valores ficaram abaixo do limite de detecção do ensaio; e,
- Em relação ao pH, nas misturas sem cal os valores tiveram uma distribuição normal com média 7,88 e desvio padrão 0,63 com um nível de confiabilidade de 95%, testados pelo método de Kolmogorov/Smirnof. Nas misturas com cal, confirmou-se uma maior alcalinidade do líquido percolado, sendo que, os valores também tiveram uma distribuição normal com um nível de confiabilidade de 95%, testados pelo método de Kolmogorov/Smirnof, com média 10,83 e desvio padrão 0,44. No Quadro 5.15 são apresentados os valores obtidos para os elementos químicos arsênio, chumbo e mercúrio.

Os ensaios visando detectar os níveis de Arsênio, Chumbo e Mercúrio

foram realizados pelo Laboratório de Análises Químicas do Centro Tecnológico da Unisul – CENTEC e são apresentados no Anexo 2.

Quadro 5.15 - Concentrações de Mercúrio, Chumbo e Arsênio nas amostras.

Misturas	Data da coleta	Ferro total	Alumínio	Manganês	Acidez	pH	Mercúrio	Chumbo	Arsênio
70/30 sem cal	30/12/02	1,59	<0,01	<0,01	12	7,62	N.D.	0,031	N.D.
50/50 c/ cal 1% cimento	23/01/03	0,34	9,71	<0,01	<0,10	10,71	N.D.	0,004	0,02
0/100 com cal	27/01/03	<0,01	1,53	<0,01	<0,10	10,68	N.D.	0,0076	0,014
0/100 sem cal	02/02/03	0,47	<0,01	<0,01	<0,10	8,92	N.D.	0,004	0,133
100/0 sem cal	10/02/03	<0,01	<0,01	<0,01	4	7,32	N.D.	N.D.	N.D.

Na Figura 5.25 são apresentados gráficos que comparam os valores obtidos com os padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde. Em relação às concentrações dos elementos químicos mercúrio, chumbo e arsênio, solubilizados nas amostras analisadas, pode-se fazer as seguintes afirmações:

- O elemento químico mercúrio não foi solubilizado em nenhuma amostra enviada para análise;
- Para o chumbo, a mistura 70/30 apresentou uma concentração de 0,031mg/l, valor acima dos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação federal. Segundo a Resolução no 20 do CONAMA, o teor máximo de chumbo na água para rios classe 1 deve ser 0,03mg/l, valor praticamente igual ao obtido nas células de percolação. Para rios classe 3² esse valor não deve ultrapassar 0,05 mg/L, valor não alcançado em nenhuma amostra analisada;
- Em relação ao elemento químico arsênio, na cinza pura a concentração do líquido percolado foi de 0,133mg/l. Os padrões de potabilidade são de 0,010mg/l, porém, na mistura 70/30 sem cal, tal elemento químico não foi detectado. Nas misturas com cal, as concentrações ficaram abaixo dos padrões de potabilidade; e,
- Em todas as misturas estabilizadas com cal as concentrações dos metais pesados perigosos, controlados pela NBR 10004 (ABNT, 1987) presentes no líquido percolado nas amostras analisadas ficaram dentro dos padrões de potabilidade do Ministério da Saúde.

² As águas de rios classe 1 são destinadas ao abastecimento público com tratamento simplificado e as águas de rios classe 3 são destinadas ao abastecimento público com tratamento convencional (BAUGARTEM e POZZA, 2001).

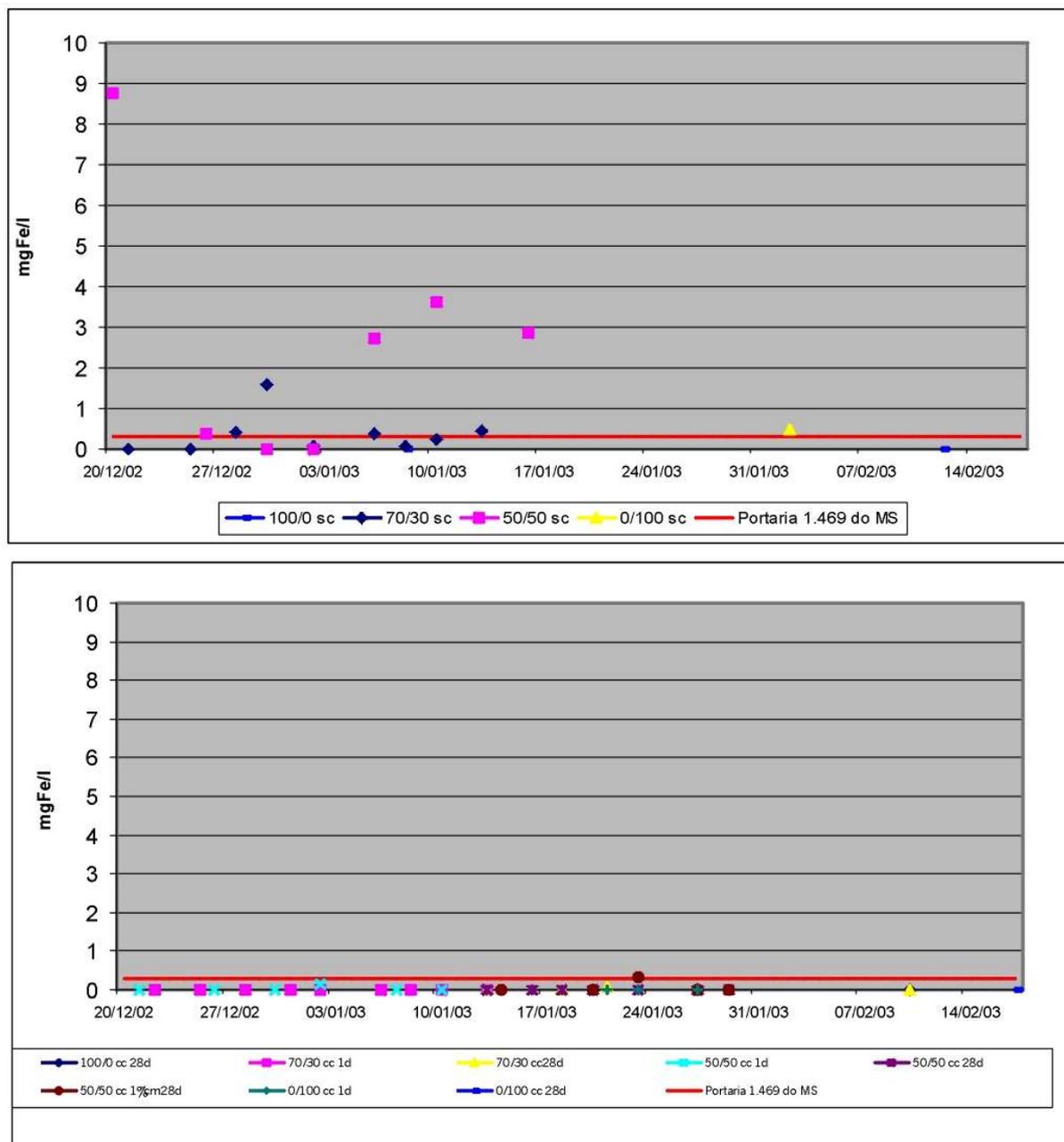


Figura 5.21 - Concentrações de Ferro total solubilizadas nas amostras sem cal e com cal.

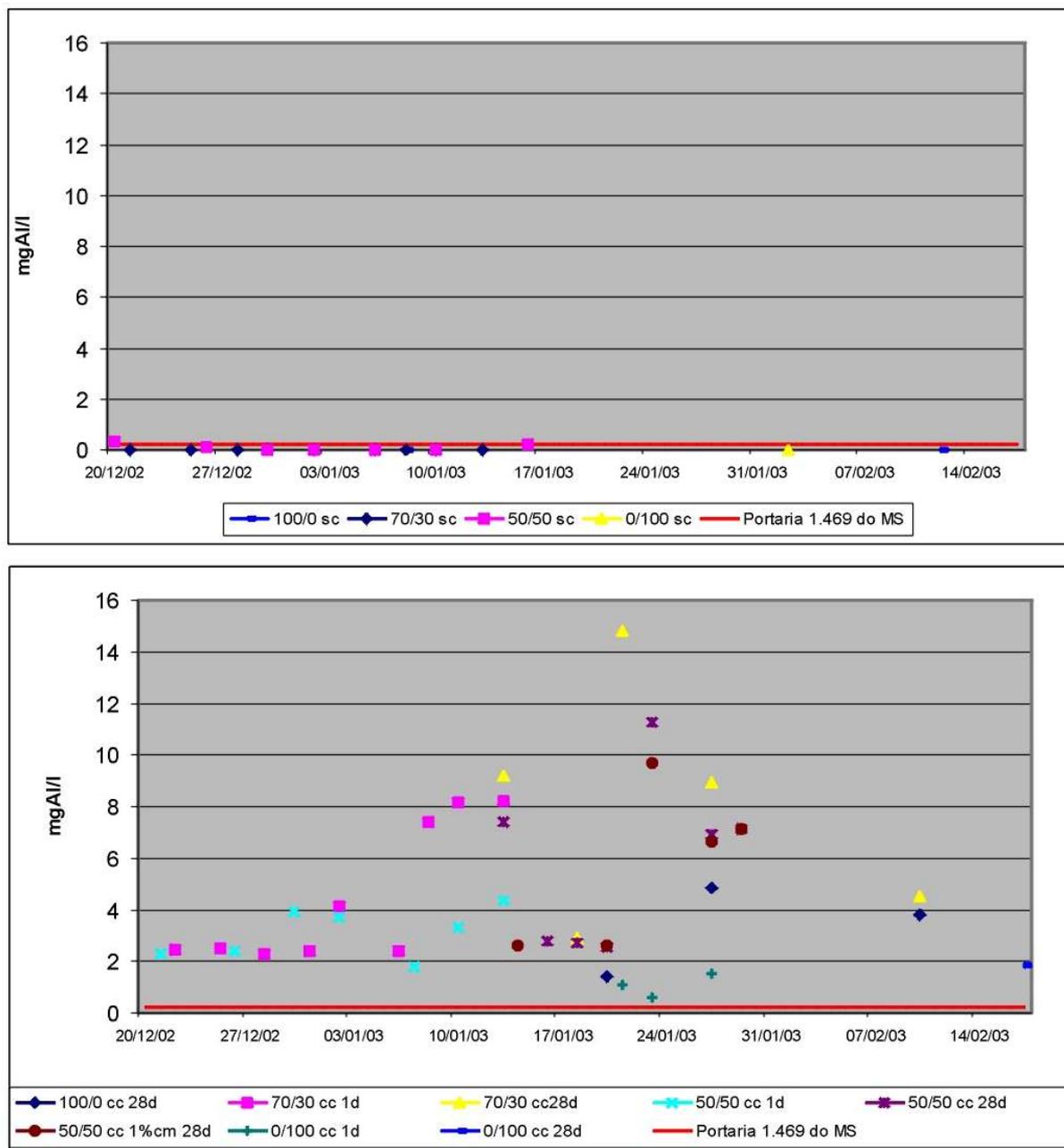


Figura 5.22 - Concentrações de Alumínio solubilizadas nas amostras sem cal e com cal.

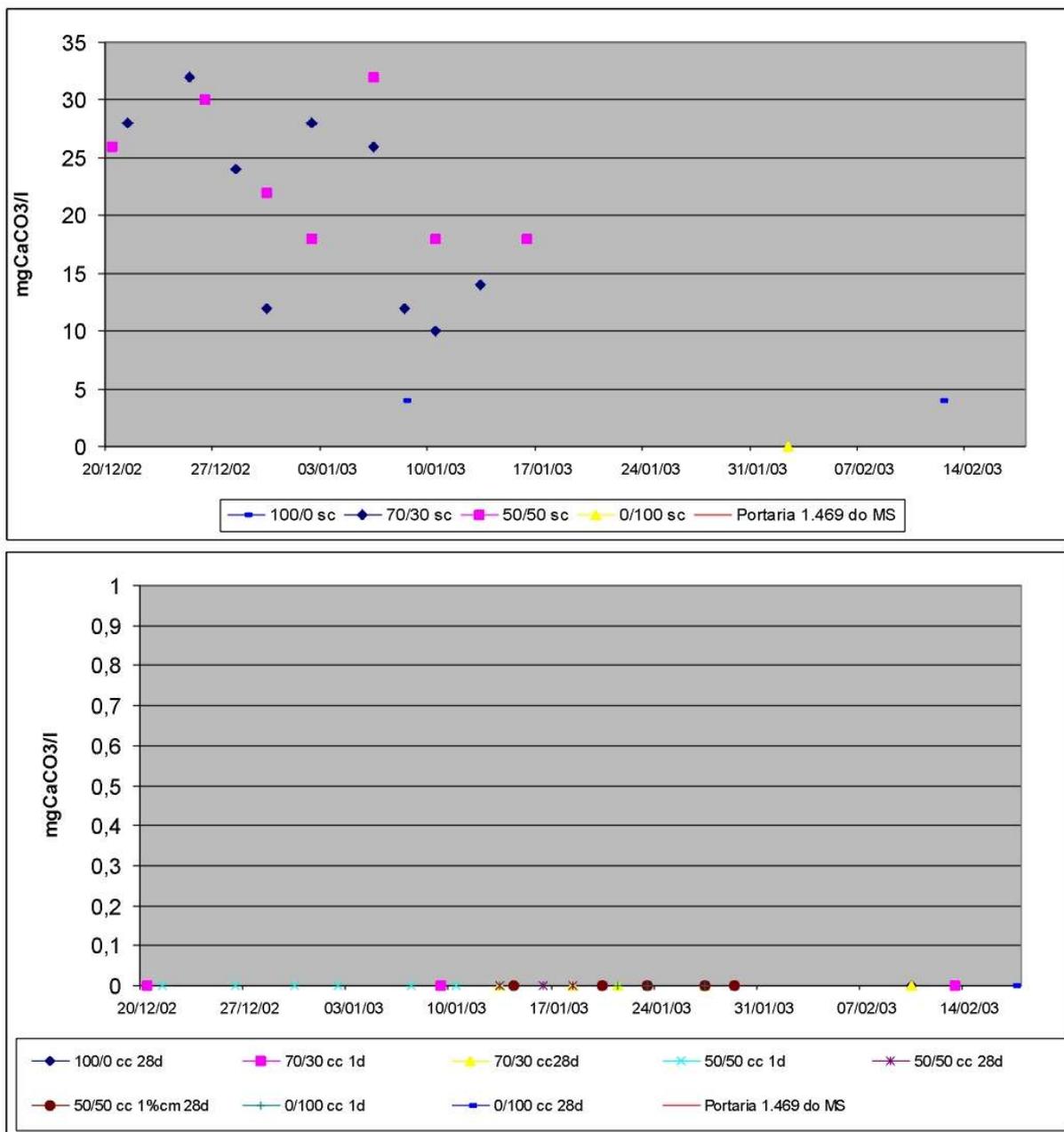


Figura 5.23- Acidez (CaCO₃) observada nas amostras sem cal e com cal.

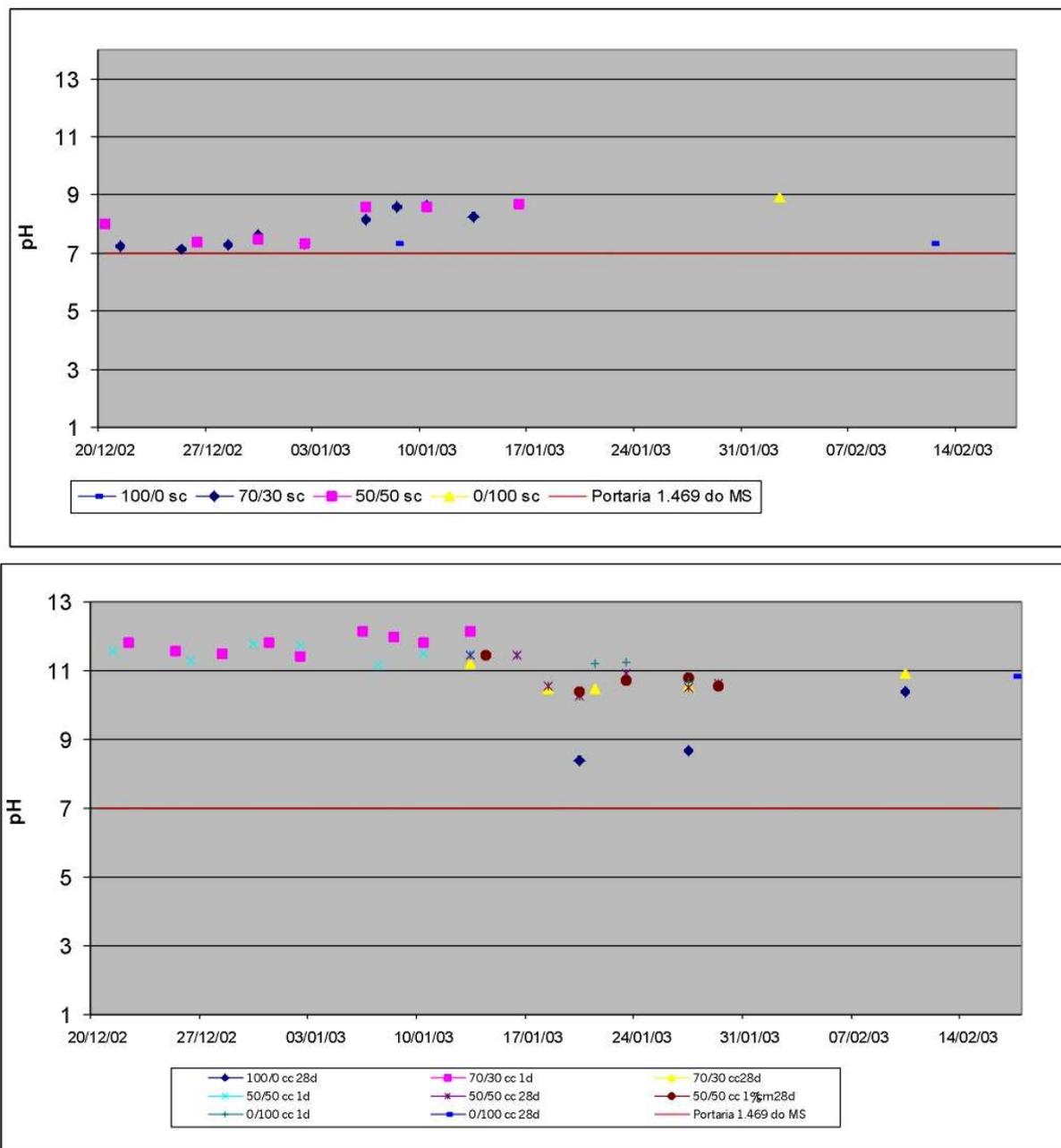


Figura 5.24 - pH observado nas amostras sem cal e com cal durante o ensaio.

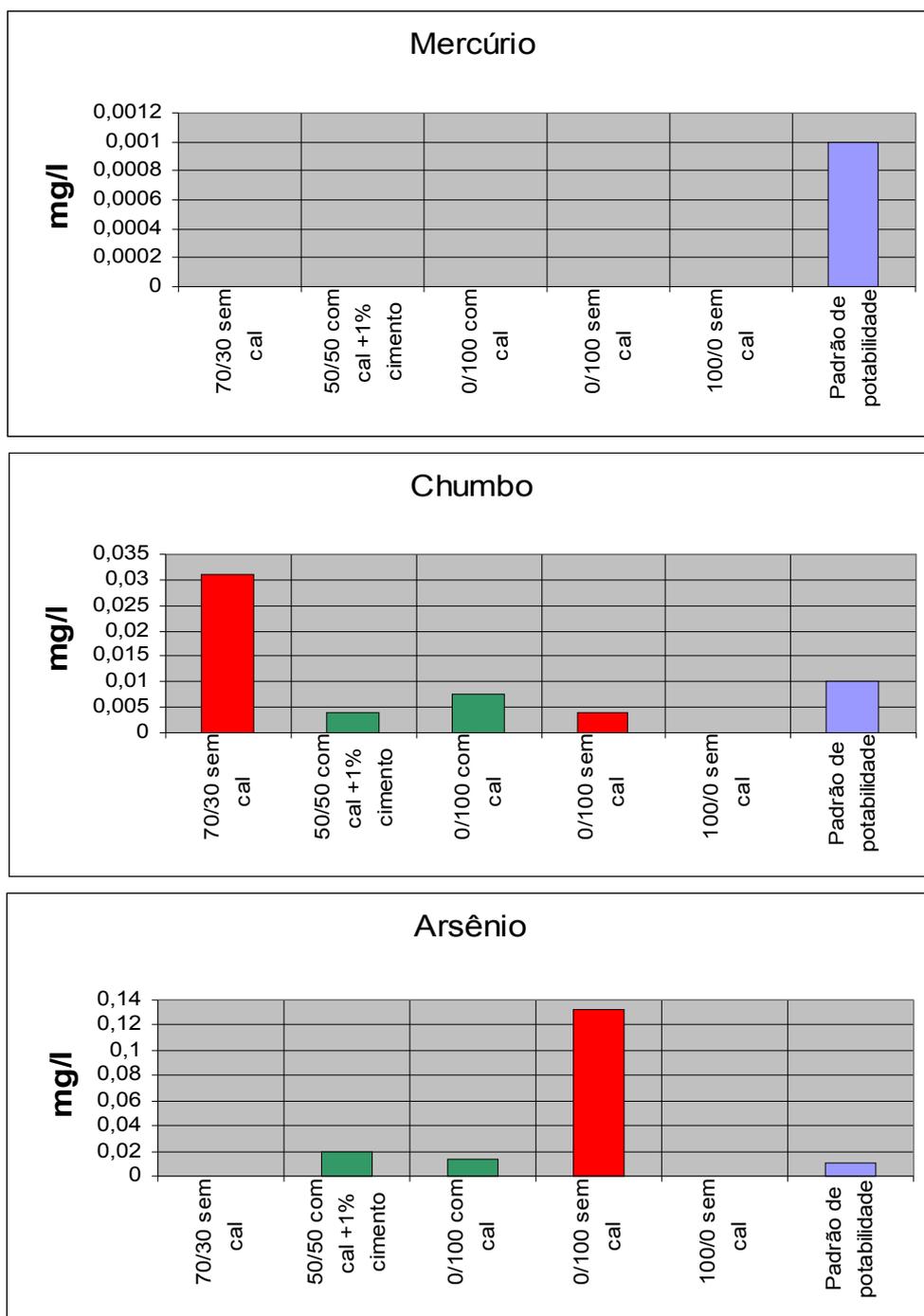


Figura 5.25 - Concentrações solubilizadas de mercúrio, chumbo e arsênio.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

A pesquisa foi desenvolvida na região dos solos Podzólicos (PV), onde se encontram a grande maioria das jazidas exploradas nas regiões próximas a Termelétrica Jorge Lacerda (municípios de Tubarão e Capivari de Baixo), o que amplia as possibilidades de aplicabilidade dos resultados positivos obtidos na pesquisa.

Os resultados obtidos permitem concluir que o solo da pesquisa é do tipo A-5 (sistema HRB de classificação) e NG (não laterítico argiloso) pela classificação MCT.

O solo estudado apresentou capacidade de suporte (CBR) variando de 5 a 11% e uma expansibilidade variando de 1,5 a 3,5%. Os resultados indicam uma variabilidade acentuada do solo na jazida (o que é comum em solos saprolíticos) e que deveria ser evitado o seu emprego na camada final de terraplenagem (expansão acima de 2%).

A cinza pesada, em seu estado natural, apresentou uma dificuldade acentuada de sua compactação e uma pequena sensibilidade da massa específica aparente seca em relação a variações significativas do teor de umidade. Ela apresentou uma elevada umidade ótima (42%), uma baixa capacidade de suporte (5%) e baixa massa específica aparente ($0,95t/m^3$). Tais características a tornam inviáveis para o emprego em camadas nobres do pavimento. Um aspecto de destaque é que a cinza pesada quando “destorroadada”, para os ensaios de granulometria, modifica significativamente as porcentagens de silte e areia, o que significa um afinamento da granulometria.

Nas avaliações das misturas solo/cinza pesada, notou-se que nas proporções estudadas ocorreu uma estabilização granulométrica do material, melhorando significativamente o comportamento geotécnico resultante. Foram obtidos valores de CBR na ordem de 20%, o que habilitaria algumas das misturas a serem aplicadas na camada final de terraplenagem. Porém, quando as misturas são analisadas quanto ao comportamento dinâmico, as misturas apresentaram um péssimo comportamento resiliente, o que inviabiliza a mesma de ser usada na camada final de terraplenagem e camada de reforço do subleito. De acordo com o comportamento resiliente das misturas solo/cinza pesada, as mesmas, somente poderiam ser utilizadas para rodovias de baixo volume de tráfego ou com

revestimento de briquetes, onde a deformabilidade da estrutura não seria tão fundamental para o desempenho do pavimento.

A estabilização das misturas solo/cinza pesada com cal melhoraram significativamente a capacidade de suporte das misturas, alcançando valores próximos a 60%. O comportamento resiliente observado habilitou a mistura a ser empregada em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis.

Segundo a aplicação da NBR-10004 – Resíduos sólido, classificação (ABNT, 1987), os materiais foram classificados como resíduos classe II, ou seja, não inertes devido as concentrações de ferro e manganês e alumínio solubilizadas em limites acima dos permitidos na norma para resíduos inertes. Para os demais elementos controlados pela NBR 10004, os níveis ficaram abaixo dos limites estabelecidos até mesmo para resíduos classe II. Ambos os materiais foram classificados como não tóxicos e não reagem violentamente quando misturados com água. A adição de solo à cinza não altera sua classificação e também não reduz a concentração dos elementos perigosos como o mercúrio e o vanádio, sendo que, para o último, houve um aumento considerável na concentração quanto adicionado o solo à cinza, porém ainda assim ficando muito abaixo dos níveis onde seriam considerados resíduos perigosos.

Com a aplicação das células de percolação, proposta em caráter piloto nessa pesquisa, notou-se que o aumento no percentual de cinza nas misturas analisadas não significou necessariamente um aumento das concentrações dos elementos monitorados.

Apesar do elemento manganês ter sido um dos responsáveis pela classificação dos materiais como classe II, o mesmo não foi solubilizado em nenhuma das 59 amostras colhidas durante o período dos ensaios.

Para as misturas solo/cinza pesada foram coletadas 19 amostras durante todo o período de ensaio. Para o elemento Ferro, nas 13 amostras onde esse elemento foi detectado, a concentração média solubilizada foi de 1,7mg/l, sendo que a portaria 1.469 do Ministério da Saúde define como 0,3mg/l o padrão de potabilidade para esse elemento. Em apenas 3 amostras foram detectadas a presença do elemento alumínio. A concentração média solubilizada foi de 0,21mg/l, valor próximo ao padrão de potabilidade especificado na legislação, que é de 0,2mg/l.

Para as misturas solo/cinza pesada estabilizadas com cal foram coletada 40 amostras de líquido percolado durante o período de ensaio. Em 100% das

amostras analisadas, a concentração solubilizada do elemento químico Ferro ficou dentro do padrão de potabilidade especificado na legislação.

Com relação ao Alumínio, o comportamento foi contrário. A partir da adição de cal às misturas solo/cinza pesada houve um aumento das concentrações solubilizadas, sendo que os valores variaram de 0,2 a 15mg/l.

A adição de cal nas misturas solo/cinza pesada reduziu a níveis não detectáveis a acidez nas amostras analisadas.

Em relação ao pH, nas amostras sem cal os valores distribuíram-se normalmente em torno da média de 7,88. Com a adição de cal, confirmou-se uma maior alcalinidade do líquido percolado, sendo que, os valores distribuíram-se normalmente em torno da média de 10,83.

Em relação aos elementos químicos mercúrio, chumbo e arsênio não foram feitas análises sistemáticas em todas as amostras coletadas.

O elemento químico mercúrio não foi solubilizado em nenhuma amostra enviada para análise.

Para o chumbo, na amostra 70/30 a concentração solubilizada foi de 0,031mg/l, valor acima dos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação federal para água de consumo humano. Essa concentração é próxima aos valores especificados para qualidade das águas de rios classe 1 (0,03mg/l), valor praticamente igual ao obtido nas células de percolação. Para rios classe 3 esse valor não deve ultrapassar 0,05 mg/L, valor não alcançado em nenhuma amostra analisada.

Para o elemento químico arsênio, na amostra de cinza pura, a concentração do líquido percolado foi de 0,133mg/l. Os padrões de potabilidade são de 0,010mg/l, porém, no corpo-de-prova 70/30 sem cal, tal elemento químico não foi detectado.

Em todas as amostras estabilizadas com cal as concentrações ficaram dentro dos padrões de potabilidade.

Pelos resultados obtidos nas amostras analisadas na pesquisa, há uma sinergia entre a estabilização de misturas solo/cinza pesada com cal quando analisados os aspectos de desempenho mecânico e os riscos ambientais. A estabilização de misturas solo/cinza pesada com cal melhora consideravelmente o desempenho mecânico da cinza e do solo. Em relação aos aspectos de interação ambiental, a adição de cal reduziu as concentrações dos elementos químicos perigosos (mercúrio, chumbo e arsênio) solubilizados em todas as amostras

analisadas.

A partir dos resultados obtidos em laboratório e da análise conduzida pode-se concluir que as misturas 70/30/4 e 50/50/3 têm potencial para serem aplicadas em camadas de sub-base de pavimentos de vias rodoviárias de baixo volume de tráfego.

6.2 Recomendações

Em relação aos resultados obtidos na pesquisa pode-se fazer as seguintes recomendações:

- Para melhor comparação dos resultados das células de percolação, recomenda-se manter a carga hidráulica constante em todo o período de ensaio, adaptando-se uma caixa de armazenagem da solução de percolação conectada às células de percolação e posicionada de maneira a manter a carga hidráulica especificada. A carga hidráulica constante em todo o período de ensaio poderá indicar uma tendência de crescimento ou decréscimo das concentrações solubilizadas ao longo do tempo;
- Aumentar o período do ensaio de percolação para 6 meses, aumentar o tempo entre cada coleta de amostras e reduzir os elementos químicos controlados, monitorando, principalmente, o comportamento do chumbo, mercúrio e arsênio;
- Com as concentrações solubilizadas obtidas nas amostras dos ensaios de percolação, realizar estudos de análise de risco em diversos cenários de exposição;
- Aumentar a escala do ensaio piloto, submetendo-o às condições naturais;
- Controlar o balanço hídrico na instalação do ensaio piloto (precipitação, evaporação, escoamento superficial, estoque de água, percolado, etc.);
- Fazer amostragens e análises químicas na água subterrânea em pontos a montante e a jusante da pista experimental executada em Imituba, onde foi usada uma mistura de areia e cinza leve (fly ash) estabilizada com cal e cimento;
- Realizar avaliações do comportamento mecânico e dos riscos ambientais da utilização da cinza pesada na pavimentação com outros tipos de solo da região.

REFERÊNCIAS

- ABNT, NBR 10007 – **Amostragem de resíduos sólidos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987.
- ABNT, NBR 10004 – **Resíduos sólidos - classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987.
- ABNT, NBR 10006 – **Solubilização de resíduos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987.
- ABNT, NBR 10005 – **Lixiviação de resíduos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987.
- ABNT, NBR 7181 - **Análise Granulométrica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.
- ABNT, NBR 6457 - **Amostras de Solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986.
- ABNT, NBR 6459 - **Determinação do Limite de Liquidez**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.
- ABNT, NBR 7180 - **Determinação do Limite de Plasticidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.
- ABNT, NBR 7182 - **Ensaio de Compactação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.
- ABNT, NBR 9895 - **Índice de Suporte Califórnia**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.
- ALEXANDRE, G.A.L. E SZIKSZAY, M. **O Comportamento Geoquímico do As, Cu, Pb e Zn em Solos com Culturas de Uvas**, Revista Brasileira de Toxicologia, 1999, v.12, n1, p.006.
- BAUGARTEM, Maria da Graça Zepca, POZZA, Simone Andréa. **Qualidade de Águas, Descrição dos parâmetros químicos referidos na Legislação Ambiental**. Editora Furg, Rio Grande, 2001, 164p.
- BLOCKER, W. V., MORRISON R. E., MORTON W. E. and BABCOCK A. W.

“Marketing Powerplant Aggregates as a Road Base Material” Proceedings of the Third International Ash Utilization Symposium, U.S. Bureau of Mines, Information Circular No. 8640, Washington, DC, 1973.

CAPUTO H. P., **Mecânica dos solos e suas aplicações** / Homero Pinto Caputo. v.1.Fundamentos, 4.ed. rev. e ampl. - Rio de Janeiro : Livros Tecnicos e Cientificos, 1981.

CASARINI, **Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores Para Solos e Águas Subterrâneas no estado de São Paulo**, CETESB, 247p, 2001.

CASTRO, M.G. S, TARIFA, R. J., **A acidez da chuva na cidade de São Paulo**, PUC-SP, obtido em: www.pucsp.br/geoweb/chuva/htm, acessado em 04/11/2002 às 18:55hs.

CULLEY, R. W., SMAIL O. H.. **“Performance of Waste Coat Ash as Highway Subbase Course”** Proceedings of the Fifth International Ash Utilization Symposium, U.S. Department of Energy, Report No. METC/SP-79/10, Part 2, Morgantown, West Virginia, 1979.

DAWSON, A. R., BULLEN, F. **Furnace Botton Ash. Its Engineering Properties and its Use as Sub-base Material**. Proc. Institute of Civil Engineers, 1991, pg. 992 - 1009.

DAWSON, A. R., NUNES, M. C. M. **“Some British Experience of the Behavior of Furnace Bottom Ash and Slate Waste for Pavement Foundations”**, Symposium Proceedings - Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and Byproducts for Construction of Highway Facilities, October (1993). 13p.

DNER – PRO 11/79. **Procedimento – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis**. Rio de Janeiro, 1979.

GOTHE, C. A. **Sistemas de controle e disposição final das cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda – SC e da Usina Termelétrica de Jacuí – RS**. I e II Seminário de estudos da aplicação dos resíduos da combustão do carvão mineral, 1º painel. Anais. Florianópolis ELETROSUL, 1990.

HILL, A. R., DAWSON, A. R., Mundy, M., **Utilisation of aggregate materials in road construction and bulk fill**, Published in the Journal of Resources, Conservation and Recycling, 2001

ISAIA, G. C. **Entraves e perspectivas para uso de elevados teores de cinza volante e cinza da casca de arroz em concreto estrutural**. Workshop Reciclagem e Reutilização de resíduos como materiais de construção civil. Anais: São Paulo: PCC-USP, 1996. p46-52.

JONES, D. A. **“Potential of Bottom Ash”**, Proceedings of the Sixth International Ash Utilization Symposium, U.S. Department of Energy, Report No. DOE/METC/82-52, Volume 1, Morgantown, West Virginia, 1982.

KE T. C., Lowell, C. W. **“Corrosity of Indiana Bottom Ash”** Transportation Research Board, Washington – DC, 1992. Artigo técnico. Disponível em: <http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/cbabs1.htm>

MARCON, A. F. **Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areia-cinza volante**. Tese (Mestre em ciência). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. UFRJ, 1977. 119p.

MOULTON, Lyle K. **“Bottom Ash and Boiler Slag”**, Proceedings of the Third International Ash Utilization Symposium. U.S. Bureau of Mines, Information Circular No. 8640, Washington, DC, 1973.

NARDI, J. V. **Estabilização de areia com cinza volante e cal – Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura**. Tese: Mestre. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 1975.

NARDI, José Vidal. **Estudo de solo estabilizado quimicamente, em laboratório e pista experimental, na implantação do trecho Rio Rufino/BR-282, na rodovia SC-427 no estado de Santa Catarina**. São Paulo, SP. 1998. p. 33-46. Reunião Anual de Pavimentação, 31^a, São Paulo, 1998. Artigo técnico. Disponível em: www.copias@epib.usp.br

NASCIMENTO, R.S.V e ABREU, E.S. **Utilização das cinzas de carvão da termelétrica Jorge Lacerda no desenvolvimento de compósitos poliméricos**. I e II Seminário de estudos da aplicação dos resíduos da combustão do carvão mineral - 6º painel. Anais: Florianópolis: ELETROSUL - Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A., 1990.

NOGAMI, J.S; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos** – SP, 1995.

NUNES, M. C. B., BRIDGES M. G., DAWSON, A. R., **Assessment of secondary material for pavement construction: Technical and Environmental Aspects**. Elsevier Science Ltd, Great Britain, 1996. pp 87-96.

POZZOBOM, C. E. **Aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no complexo termelétrico Jorge Lacerda**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC, 1997. 122p.

PINTO, S: PREUSSLER, E - **Pavimentação Rodoviária - Conceitos Fundamentais sobre pavimentos flexíveis**, 1ª ed.- Rio de Janeiro: Copiadora e Artes Gráficas Ltda, 2001 - 259p.

ROCCA, ALFREDO CARLOS L., IACAVONE, ANGELA MARIA M. B., **Resíduos Sólidos Industriais**, 2ª edição revisada e ampliada, CETESB – São Paulo, 1993. p.89.

SCHROEDER, R. L., **The Use of Recycled Materials in Highway Construction**, U.S. Department of transportation, Federal Highway Administration (FHWA), 1994. Disponível em: <http://www.tfrc.gov/pubrds/fall94/p94au32.htm>, acessado em 10/01/2003. p.8.

SEALS, R. K., MOULTON L. K., and RUTH B. E.. **“Bottom Ash: An Engineering Material”**, American Society of Civil Engineers, Journal of the Soils and Foundation Division, April, 1972.

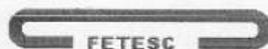
SLOOT, H. A., GOUMAN, J. J. J. R., AALBERS, Th. G., **Systematic leaching behaviour of trace elements from construction materials and waste materials**. In: Waste Materials in Construction. Elsevier Applied Science, London (1991).

UFRGS/Centro de Ecologia, **Carvão e meio ambiente**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Ed. Universidade, p.467, 2000.

WREGGE, M., **Termos Hidrogeológicos Básicos**, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, acessado em 05/07/2004 e disponível em: http://www.abas.org/estudos/hidrogeologia/termos_hidrogeo.htm p.8.

ZIMBRES, E., **Guia avançado sobre água subterrânea**, Meio ambiente pro Br, disponível em: <http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/quimica.htm>, acessado em: 13/01/2003 as 16:43, 11p.

ANEXOS



Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Florianópolis, 26 de fevereiro de 2003

A/C
EDINEI

Informamos que o laboratório de Saneamento Básico do CEFET/SC (Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina) com apoio da FETESC (Fundação de Ensino Técnico de Santa Catarina) é registrado no Conselho Regional de Química (n.º 2302 na 13ª Região) para prestações de serviços em análises de águas e efluentes com técnicos cadastrados.

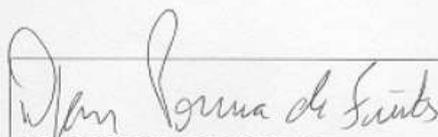
Toda nossa metodologia de preservação e análise das amostras são orientadas pelo STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER APHA-AWWA-WPCF, 20ª edição. Esta metodologia de análise é a mesma recomendada pelo CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente.

As análises realizadas estão descritas abaixo:

ANÁLISES	PÁGINA	METODOLOGIA DE ANÁLISE
pH	4-86	n.4500-H <i>electrometric method</i>
Alumínio	3-56	n. 3500-B Eriochrome Cyanine R Method
Manganês	3-83	n. 3500-A <i>Persulfate Method</i>
Ferro	3-76	n. 3500-B Phenanthroline Method
Acidez	2-24	n. 2310-B <i>Titration Method</i>

Afirmamos que a metrologia dos equipamentos utilizados acima é realizada por laboratórios especializados, os quais pertencem a RBC (Rede Brasileira de Calibração), sendo estas calibrações realizadas de acordo com as necessidades dos equipamentos.

Atenciosamente


DJAN PORRUA DE FREITAS
 Técnico Responsável – CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
 AV. MAURO RAMOS, 950
 CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
 FONE: (048) 221 - 0603 - Laboratório Saneamento
 9960 - 0085 Técnico Responsável



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO - CENTEC

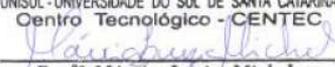
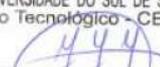
LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS

INTERESSADO:

FUNDAÇÃO DE ENSINO E ENGENHARIA DE SANTA CATARINA

Laudo Nº: 545/04/2003	Data da Coleta: XXX	Hora da Coleta: xxx
Município: Florianópolis - SC	Local da Coleta: xxx	Manancial: xxx
Temperatura da Água: xxx	Temperatura do Ambiente: xxx	Amostrador: Engº. Edney Rodrigues de Farias
Data de Entrada no Laboratório: 14/04/2003		
AMOSTRA 01 (0/100 SEM CAL)		
ANÁLISES	RESULTADO	METODOLOGIA
Mercúrio, mg/L	N.D.	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
Chumbo, mg/L	0,004	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
Arsênio, mg/L	0,133	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
OBSERVAÇÕES:		
1 - As análises são realizadas Segundo American Public Health Association: Standard Methods for the Examination of the Water and Wastwater. Washington: 1995. 1 v.		
2 - N.D. - Não detectado.		

Tubarão (SC), 16 de abril de 2003

UNISUL - UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
Centro Tecnológico - CENTEC

 Profª Márcia Lúzia Michels
 CRQ -13º R. 13200099
 Engª. Química Responsável
UNISUL - UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
Centro Tecnológico - CENTEC

 Prof. Dr. Jair Juárez João
 Coordenador do CENTEC



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO - CENTEC

LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS

INTERESSADO:

FUNDAÇÃO DE ENSINO E ENGENHARIA DE SANTA CATARINA

Laudo Nº: 546/04/2003	Data da Coleta: XXX	Hora da Coleta: xxx
Município: Florianópolis - SC	Local da Coleta: xxx	Manancial: xxx
Temperatura da Água: xxx	Temperatura do Ambiente: xxx	Amostrador: Eng ^o . Edney Rodrigues de Farias

Data de Entrada no Laboratório: 14/04/2003

AMOSTRA 02 (100/0 SEM CAL)

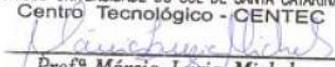
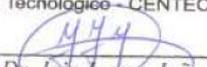
ANÁLISES	RESULTADO	METODOLOGIA
Mercúrio, mg/L	N.D.	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
Chumbo, mg/L	N.D.	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
Arsênio, mg/L	N.D.	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite

OBSERVAÇÕES:

1 - As análises são realizadas Segundo American Public Health Association: Standard Methods for the Examination of the Water and Wastewater. Washington: 1995, 1 v.

2 - N.D. - Não detectado.

Tubarão (SC), 16 de abril de 2003

UNISUL - UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
Centro Tecnológico - CENTEC

 Prof.ª Márcia Luzia Michels
 CRQ -13º R. 13200099
 Eng.ª Química Responsável
UNISUL - UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
Centro Tecnológico - CENTEC

 Prof. Dr. Jair Juarez João
 Coordenador do CENTEC



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO - CENTEC**LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS****INTERESSADO: FUNDAÇÃO DE ENSINO E ENGENHARIA DE SANTA CATARINA**

Laudo Nº: 547/04/2003	Data da Coleta: XXX	Hora da Coleta: XXX
Município: Florianópolis - SC	Local da Coleta: xxx	Manancial: xxx
Temperatura da Água: xxx	Temperatura do Ambiente: xxx	Amostrador: Engº. Edney Rodrigues de Farias

Data de Entrada no Laboratório: 14/04/2003

AMOSTRA 03 (50/50 COM CAL + 1% DE CIMENTO)

ANÁLISES	RESULTADO	METODOLOGIA
Mercúrio, mg/L	N.D.	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
Chumbo, mg/L	0,004	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
Arsênio, mg/L	0,020	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite

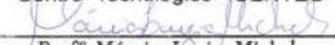
OBSERVAÇÕES:

1 - As análises são realizadas Segundo American Public Health Association: Standard Methods for the Examination of the Water and Wastwater. Washington: 1995. 1 v.

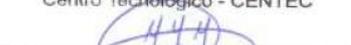
2 - N.D. - Não detectado.

Tubarão (SC), 16 de abril de 2003

 UNISUL - UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
 Centro Tecnológico - CENTEC


 Profª Márcia Luzia Michels
 CRQ - 13º R. 13200099
 Engª. Química Responsável

 UNISUL - UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
 Centro Tecnológico - CENTEC


 Prof. Dr. Jair Juarez João
 Coordenador do CENTEC



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO - CENTEC

LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS

INTERESSADO: FUNDAÇÃO DE ENSINO E ENGENHARIA DE SANTA CATARINA

Laudo Nº: 548/04/2003	Data da Coleta: XXX	Hora da Coleta: xxx
Município: Florianópolis - SC	Local da Coleta: xxx	Manancial: xxx
Temperatura da Água: xxx	Temperatura do Ambiente: xxx	Amostrador: Engº. Edney Rodrigues de Farias
Data de Entrada no Laboratório: 14/04/2003		
AMOSTRA 04 (70/30 SEM CAL)		
ANÁLISES	RESULTADO	METODOLOGIA
Mercúrio, mg/L	N.D.	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
Chumbo, mg/L	0,031	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
Arsênio, mg/L	N.D.	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
OBSERVAÇÕES:		
1 - As análises são realizadas Segundo American Public Health Association: Standard Methods for the Examination of the Water and Wastwater. Washington: 1995. 1 v.		
2 - N.D. - Não detectado.		

Tubarão (SC), 16 de abril de 2003

UNISUL - UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
Centro Tecnológico - CENTEC

Marcia Luzia Michels
Profª Márcia Luzia Michels
CRQ - 13º R. 13200099
Engª. Química Responsável

UNISUL - UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
Centro Tecnológico - CENTEC

444
Prof. Dr. Jair Juarez João
Coordenador do CENTEC



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO - CENTEC

LABORATÓRIO DE ANÁLISES QUÍMICAS

INTERESSADO: FUNDAÇÃO DE ENSINO E ENGENHARIA DE SANTA CATARINA

Laudo Nº: 549/04/2003	Data da Coleta: XXX	Hora da Coleta: xxx
Município: Florianópolis - SC	Local da Coleta: xxx	Manancial: xxx
Temperatura da Água: xxx	Temperatura do Ambiente: xxx	Amostrador: Engº. Edney Rodrigues de Farias

Data de Entrada no Laboratório: 14/04/2003

AMOSTRA 05 (0/100 COM CAL)

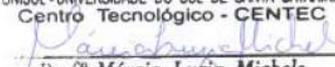
ANÁLISES	RESULTADO	METODOLOGIA
Mercúrio, mg/L	N.D.	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
Chumbo, mg/L	0,0076	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite
Arsênio, mg/L	0,014	Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Forno de Grafite

OBSERVAÇÕES:

1 - As análises são realizadas Segundo American Public Health Association: Standard Methods for the Examination of the Water and Wastewater. Washington: 1995. 1 v.

2 - N.D. - Não detectado.

Tubarão (SC), 16 de abril de 2003

UNISUL - UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
Centro Tecnológico - CENTEC

 Prof.ª Márcia Luzia Michels
 CRQ - 13º R. 13200099
 Eng.ª Química Responsável
UNISUL - UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
Centro Tecnológico - CENTEC

 Prof. Dr. Jair Juarez João
 Coordenador do CENTEC

Anexo 3 – Laudos da Greenlab



Porto Alegre, 27 de setembro de 2002.

Lauda nº 13143/02

Interessado: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Material: 100% Cinza.

Data de Recebimento: 31.08.02.

Período da Análise: 31.08 a 19.09.02

Análise: Ensaio de Lixiviação segundo NBR 10.005;
Ensaio de Solubilização segundo NBR 10.006;
Classificação do Resíduo Segundo NBR 10.004 e Composição do Resíduo.

1 . Plano de Amostragem, Segundo NBR 10.007

1.1. Objetivos

Caracterização de Resíduo segundo NBR 10.004.

1.2. Pré Caracterização

Cinza pesada.

1.3. Pontos de Amostragem

Bacias de decantação da usina termoeletrica Jorge Lacerda.

1.4. Tipo de Amostrador

Amostrador para resíduo sólido.

1.5. Volume

Aproximadamente 1.000 gramas.

1.6. Data de chegada ao Laboratório

31.08.02

Continua 1/4 ...



Continuação Laudo nº 13143/02 pág. 2/4.

2. Aspecto da Amostra

Sólido de coloração cinza e inodoro.

3. Reatividade

Não reage de forma violenta com a água e nem forma misturas potencialmente explosivas.

4. Inflamabilidade

Não produz fogo em condições normais de temperatura e pressão, nem sob aquecimento a 100°C.

5. Corrosividade

Não é corrosivo, pois o pH situa-se acima de 2,0 e abaixo de 12,0.

7. Resultados:

Composição do Resíduo				
Parâmetros	Amostra	V.R. – NBR 10004 Anexo I - Listagem 9	Limite de Detecção	Método
Arsênio (mg As/Kg)	0,94	1.000	0,001	E.A.A - Geração de Hidretos
Chumbo (mg Pb/Kg)	1,29	1000	0,001	E.A.A - Forno de Grafite
Cianeto (mg CN/Kg)	0,61	1.000	0,004	Piridina Pirazolona
Cromo (mg Cr/Kg)	6,35	100	0,001	E.A.A – Forno de Grafite
Fenol (mg Fenol/Kg)	n.d.	10	0,10	Aminoantipirina
Matéria Orgânica (%)	1,09	-	-	Refluxo com Dicromato
Mercurio (mg Hg/Kg)	1,13	100	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
pH 10%	6,6	-	0,01	Potenciométrico
Selênio (mg Se/Kg)	0,15	100	0,001	E.A.A – Geração de hidretos
Sulfeto (mg S ²⁻ /Kg)	n.d.	-	0,10	Azul de Metileno
Umidade (%)	28,9	-	-	Gravimétrico
Vanádio (mg V/Kg)	3,27	1.000	0,008	E.A.A – Forno de Grafite

Continua 2/4...



Continuação do Laudo nº 13143/02 pág. 3/4.

Ensaio de Lixiviação				
Parâmetros	Amostra	V.R. – NBR 10004 Anexo G – Listagem 7	Limite de Detecção	Método
Arsênio (mg As/L)	0,02	5,0	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
Bário (mg Ba/L)	1,14	100	0,008	E.A.A – Forno de Grafite
Cádmio (mg Cd/L)	n.d.	0,5	0,0001	E.A.A – Forno de Grafite
Chumbo (mg Pb/L)	0,06	5,0	0,001	E.A.A – Forno de grafite
Cromo (mg Cr/L)	n.d.	5,0	0,001	E.A.A – Forno de Grafite
Fluoreto (mg F/L)	n.d.	150	0,20	SPADNS
Mercurio (mg Hg/L)	n.d.	0,1	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
pH inicial	7,0	-	0,01	Potenciométrico
Prata (mg Ag/L)	n.d.	5,0	0,0001	E.A.A – Forno de Grafite
Selênio (mg Se/L)	n.d.	1,0	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos

Ensaio de Solubilização				
Parâmetros	Amostra	V.R. – NBR 10004 Anexo H – Listagem 8	Limite de Detecção	Método
Alumínio (mg Al/L)	0,21	0,2	0,001	E.A.A – Forno de Grafite
Arsênio (mg As/L)	n.d.	0,05	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
Bário (mg Ba/L)	0,03	1,0	0,008	E.A.A – Forno de Grafite
Cádmio (mg Cd/L)	n.d.	0,005	0,0001	E.A.A – Forno de Grafite
Chumbo (mg Pb/L)	n.d.	0,05	0,001	E.A.A – Forno de Grafite
Cianeto (mg CN/L)	n.d.	0,1	0,004	Piridina – Pirazolona
Cloreto (mg Cl/kg)	14,6	250	0,50	Nitrato de Mercúrio
Cobre (mg Cu/L)	n.d.	1,0	0,001	E.A.A – Chama
Cromo (mg Cr/L)	n.d.	0,05	0,001	E.A.A – Forno de Grafite
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	114	500	0,10	Complexometria
Fenol (mg Fenol/L)	n.d.	0,001	0,001	Aminoantipirina
Ferro (mg Fe/L)	0,39	0,3	0,005	E.A.A – Chama
Fluoreto (mg F/L)	n.d.	1,5	0,20	SPADNS
Manganês (mg Mg/L)	0,18	0,1	0,003	E.A.A – Chama
Mercurio (mg Hg/L)	n.d.	0,001	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
Nitrato (mg NO ₃ /L)	n.d.	10,0	0,20	Salicilato
pH final	7,5	-	0,01	Potenciométrico
Prata (mg Ag/L)	n.d.	0,05	0,0001	E.A.A – Forno de Grafite
Selênio (mg Se/L)	n.d.	0,01	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
Sódio (mg Na/L)	21,5	200	0,005	E.A.A – Chama
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /L)	47,2	400	2,0	Turbidimétrico
Surfactantes (mg MBAS/L) (*)	n.d.	0,2	0,05	Azul de Metileno
Zinco (mg Zn/L)	n.d.	5,0	0,001	E.A.A – Chama

E.A.A. – Espectrofotometria de Absorção Atômica

n.d.: nada detectado

V.R. – Valor de Referência

(*) MBAS – Substâncias ativas ao Azul de Metileno (Methylene blue active substances).

Continua 3/4...



Continuação Laudo nº 13143/02 pág. 4/4.

8. Classificação do Resíduo, segundo NBR 10.004

De acordo com o anexo I da listagem nº 9, nenhum parâmetro ultrapassou o Limite Máximo Permitido pela Legislação.

Pelo ensaio de Lixiviação, o Resíduo apresentou-se como **NÃO TÓXICO - TL**.

O Ensaio de Solubilização apresentou os seguintes parâmetros que ultrapassaram o Limite Máximo Permitido pela Legislação: Alumínio, Ferro e Manganês.

Caracterizando o resíduo como **NÃO INERTE**.

Este comportamento caracteriza o resíduo como **CLASSE II – NÃO INERTE**.

Graciema Formolo Pellini
Químico – CRQ-V-05200428

Cadastro na FEPAM – Nº 14/2002 -DL

NOTA: Os resultados contidos neste certificado se aplicam tão somente à amostra ensaiada e só podem ser reproduzidos na íntegra.



Porto Alegre, 27 de setembro de 2002.

Laudos nº 13144/02

Interessado: *UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL*

Material: 52% Cinza + 50% Solo.

Data de Recebimento: 31.08.02.

Período da Análise: 31.08 a 19.09.02

*Análise: Ensaio de Lixiviação segundo NBR 10.005;
Ensaio de Solubilização segundo NBR 10.006;
Classificação do Resíduo Segundo NBR 10.004
e Composição do Resíduo.*

1 . Plano de Amostragem, Segundo NBR 10.007

1.1. Objetivos

Caracterização de Resíduo segundo NBR 10.004.

1.2. Pré Caracterização

50% Cinza pesada e 50% Solo.

1.3. Pontos de Amostragem

Bacias de decantação da usina termoeletrica Jorge Lacerda para cinza e solo da região.

1.4. Tipo de Amostrador

Amostrador para resíduo sólido.

1.5. Volume

Aproximadamente 1.000 gramas.

1.6. Data de chegada ao Laboratório

31.08.02

Continua 1/4 ...



Continuação Laudo nº 13144/02 pág. 2/4.

2. Aspecto da Amostra

Sólido arenoso de coloração cinza e inodoro.

3. Reatividade

Não reage de forma violenta com a água e nem forma misturas potencialmente explosivas.

4. Inflamabilidade

Não produz fogo em condições normais de temperatura e pressão, nem sob aquecimento a 100°C.

5. Corrosividade

Não é corrosivo, pois o pH situa-se acima de 2,0 e abaixo de 12,0.

7. Resultados:

Composição do Resíduo				
Parâmetros	Amostra	V.R. – NBR 10004 Anexo I - Listagem 9	Limite de Detecção	Método
Arsênio (mg As/Kg)	4,54	1.000	0,001	E.A.A - Geração de Hidretos
Chumbo (mg Pb/Kg)	30,6	1000	0,001	E.A.A - Forno de Grafite
Cianeto (mg CN/Kg)	0,45	1.000	0,004	Piridina Pirazolona
Cromo (mg Cr/Kg)	4,14	100	0,001	E.A.A – Forno de Grafite
Fenol (mg Fenol/Kg)	n.d.	10	0,10	Aminoantipirina
Matéria Orgânica (%)	2,00	-	-	Refluxo com Dicromato
Merúrio (mg Hg/Kg)	2,15	100	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
pH 10%	6,8	-	0,01	Potenciométrico
Selênio (mg Se/Kg)	0,36	100	0,001	E.A.A – Geração de hidretos
Sulfeto (mg S ²⁻ /Kg)	n.d.	-	0,10	Azul de Metileno
Umidade (%)	15,9	-	-	Gravimétrico
Vanádio (mg V/Kg)	214	1.000	0,008	E.A.A – Forno de Grafite

Continua 2/4...



Continuação do Laudo nº 13144/02 pág. 3/4.

Ensaio de Lixiviação				
Parâmetros	Amostra	V.R. – NBR 10004 Anexo G – Listagem 7	Limite de Detecção	Método
Arsênio (mg As/L)	0,21	5,0	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
Bário (mg Ba/L)	0,76	100	0,008	E.A.A – Forno de Grafite
Cádmio (mg Cd/L)	n.d.	0,5	0,0001	E.A.A – Forno de Grafite
Chumbo (mg Pb/L)	0,12	5,0	0,001	E.A.A – Forno de grafite
Cromo (mg Cr/L)	n.d.	5,0	0,001	E.A.A – Forno de Grafite
Fluoreto (mg F/L)	n.d.	150	0,20	SPADNS
Mercúrio (mg Hg/L)	n.d.	0,1	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
pH inicial	5,9	-	0,01	Potenciométrico
Prata (mg Ag/L)	n.d.	5,0	0,0001	E.A.A – Forno de Grafite
Selênio (mg Se/L)	n.d.	1,0	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos

Ensaio de Solubilização				
Parâmetros	Amostra	V.R. – NBR 10004 Anexo H – Listagem 8	Limite de Detecção	Método
Alumínio (mg Al/L)	0,06	0,2	0,001	E.A.A – Forno de Grafite
Arsênio (mg As/L)	n.d.	0,05	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
Bário (mg Ba/L)	n.d.	1,0	0,008	E.A.A – Forno de Grafite
Cádmio (mg Cb/L)	n.d.	0,005	0,0001	E.A.A – Forno de Grafite
Chumbo (mg Pb/L)	0,01	0,05	0,001	E.A.A – Forno de Grafite
Cianeto (mg CN/L)	n.d.	0,1	0,004	Piridina – Pirazolona
Cloreto (mg Cl/kg)	7,30	250	0,50	Nitrato de Mercúrio
Cobre (mg Cu/L)	n.d.	1,0	0,001	E.A.A – Chama
Cromo (mg Cr/L)	n.d.	0,05	0,001	E.A.A – Forno de Grafite
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	50,0	500	0,10	Complexometria
Fenol (mg Fenol/L)	n.d.	0,001	0,001	Aminoantipirina
Ferro (mg Fe/L)	0,41	0,3	0,005	E.A.A – Chama
Fluoreto (mg F/L)	n.d.	1,5	0,20	SPADNS
Manganês (mg Mg/L)	0,64	0,1	0,003	E.A.A – Chama
Mercúrio (mg Hg/L)	n.d.	0,001	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
Nitrato (mg NO ₃ /L)	0,21	10,0	0,20	Salicilato
pH final	6,8	-	0,01	Potenciométrico
Prata (mg Ag/L)	n.d.	0,05	0,0001	E.A.A – Forno de Grafite
Selênio (mg Se/L)	n.d.	0,01	0,001	E.A.A – Geração de Hidretos
Sódio (mg Na/L)	29,3	200	0,005	E.A.A – Chama
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /L)	26,9	400	2,0	Turbidimétrico
Surfactantes (mg MBAS/L) (*)	n.d.	0,2	0,05	Azul de Metileno
Zinco (mg Zn/L)	n.d.	5,0	0,001	E.A.A – Chama

E.A.A. – Espectrofotometria de Absorção Atômica

n.d.: nada detectado

V.R. – Valor de Referência

(*) MBAS – Substâncias ativas ao Azul de Metileno (Methylene blue active substances).

Continua 3/4...



Continuação Laudo nº 13144/02 pág. 4/4.

8. Classificação do Resíduo, segundo NBR 10.004

De acordo com o anexo I da listagem nº 9, nenhum parâmetro ultrapassou o Limite Máximo Permitido pela Legislação.

Pelo ensaio de Lixiviação, o Resíduo apresentou-se como **NÃO TÓXICO - TL**.

O Ensaio de Solubilização apresentou os seguintes parâmetros que ultrapassaram o Limite Máximo Permitido pela Legislação: Ferro e Manganês.

Caracterizando o resíduo como **NÃO INERTE**.

Este comportamento caracteriza o resíduo como **CLASSE II – NÃO INERTE**.

Graciema Formolo Pellini
Químico – CRQ-V-05200428

Cadastro na FEPAM – Nº 14/2002 -DL

NOTA: Os resultados contidos neste certificado se aplicam tão somente à amostra ensaiada e só podem ser reproduzidos na íntegra.

Anexo 4 – Planilha de acompanhamento e coleta de amostras

Planilha de registro de coletas de amostras nas células de percolação

Identificação da célula	Compaedação do corpo de prova	Montagem da célula	Início da percolação		Sim	Não	Cura da amostra		Coleta de amostras			3		
			Data	Horário			Data de início	Data de fim	Data	Horário	H [mm]*	Data	Horário	H [mm]*
1000 sem cal	13/12/02	19/12/02	19/12/02	17:00:00			19/11	10/02/03	19:11	70	10/02/03	19:11	78	
1000 com cal 28 dias	11/12/02	07/01/03	09/01/03	19:50:00		X		27/01/03	12:38	30	28/12/02	16:25	61	
7030 com cal 1 dia	13/12/02	19/12/02	19/12/02	17:00:00		X		25/12/02	13:24	46	21/01/03	18:42	48	
7030 com cal 28 dias	11/12/02	07/01/03	09/01/03	19:50:00		X		19/01/03	10:25	51	29/12/02	16:25	58	
7030 sem cal	13/12/02	19/12/02	19/12/02	17:00:00		X		25/12/02	13:24	93	30/12/02	11:45	62	
5050 com cal 1 dia	12/12/02	19/12/02	19/12/02	17:00:00		X		21/12/02	9:00	47	19/01/03	10:25	40	
5050 com cal 28 dias	12/12/02	07/01/03	09/01/03	13:11:00		X		13/01/03	19:02	75	23/01/03	13:17	37	
5050 com cal +1% cimento 28 dias	12/12/02	07/01/03	09/01/03	13:11:00		X		14/01/03	16:51	84	23/01/03	13:17	37	
0700 com cal 1 dia	19/12/02	19/12/02	19/12/02	17:00:00		X		20/12/02	17:00	44	26/12/02	11:45	80	
0700 com cal 28 dias	19/12/02	07/01/03	07/01/03	19:12:02		X		23/01/03	13:17	90	30/12/02	11:45	80	
0700 sem cal	19/12/02	19/12/02	19/12/02	17:00:00		X		02/02/03	19:11	12	02/02/03	12:38	9	

Identificação da célula	4	5	6
	Data	Horário	H [mm]*
1000 sem cal	30/12/02	11:45	37
1000 com cal 28 dias	27/01/03	12:38	70
7030 com cal 1 dia	30/12/02	11:45	62
7030 com cal 28 dias	02/01/03	14:29	46
7030 sem cal 1 dia	20/01/03	19:03	70
5050 com cal 28 dias	27/01/03	12:38	65
5050 sem cal	02/01/03	14:29	40
0700 com cal 1 dia			
0700 com cal 28 dias			

Identificação da célula	7	8	9
	Data	Horário	H [mm]*
1000 sem cal	02/01/03	14:29	71
1000 com cal 28 dias	02/01/03	14:29	100
7030 com cal 1 dia	02/01/03	8:31	64
7030 com cal 28 dias	07/01/03	13:17	77
7030 sem cal 1 dia	23/01/03	20:20	42
5050 com cal 28 dias	23/01/03	9:51	40
5050 sem cal	06/01/03	9:51	45
0700 com cal 1 dia			
0700 com cal 28 dias			

Identificação da célula	7	8	9
	Data	Horário	H [mm]*
1000 sem cal	09/01/03	16:45	52
1000 com cal 28 dias	09/01/03	19:45	47
7030 com cal 1 dia	13/01/03	18:02	41
7030 com cal 28 dias	29/01/03	20:20	61
7030 sem cal 1 dia	16/01/03	13:23	48
5050 com cal 28 dias			
5050 sem cal			
0700 com cal 1 dia			
0700 com cal 28 dias			

Identificação da célula	7	8	9
	Data	Horário	H [mm]*
1000 sem cal	09/01/03	16:45	52
1000 com cal 28 dias	09/01/03	19:45	47
7030 com cal 1 dia	13/01/03	18:02	41
7030 com cal 28 dias	29/01/03	20:20	61
7030 sem cal 1 dia	16/01/03	13:23	48
5050 com cal 28 dias			
5050 sem cal			
0700 com cal 1 dia			
0700 com cal 28 dias			

* altura percolada em cada amostra registrada no momento da coleta

2 Total de amostras coletadas

59

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 - 33 **I.E.** 250.450.615

I.M. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
461099	AMOSTRA 1	50 - 50 com cal AM 04 (28d) (1% cimento)	23/01/2003 - 27/01/2003	13h55 - 12h38
461199	AMOSTRA 2	70 - 30 com cal AM 04 (28d)	21/01/2003 - 27/01/2003	18h50 - 12h38
461299	AMOSTRA 3	50 - 50 com cal AM 06 (28d)	23/01/2003 - 27/01/2003	13h55 - 12h38
465399	AMOSTRA 4	50 - 50 com cal AM 05 (28d) (1% cimento)	27/01/2003 - 29/01/2003	12h50 - 20h20
465499	AMOSTRA 5	50 - 50 com cal AM 07 (28d)	27/01/2003 - 29/01/2003	12h50 - 20h20

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	6.64	8.94	6.90	7.15	7.12	mg/L Al
Acidez Total	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	mg/L CaCO ₃
pH	10.78	10.57	10.53	10.55	10.62	—


DIAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento - CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
FONE: (048) 221 - 0603 Laboratório Saneamento
9960 - 0085 Técnico Responsável

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 - 33

I.E. 250.450.615

I.M. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
474799	AMOSTRA 1	0 - 100 sem cal AM 01	10/02/2003	19h11
474899	AMOSTRA 2	100 - 0 sem cal AM 02	08/01/2003 - 10/02/2003	19h50 - 19h11
474999	AMOSTRA 3	100 - 0 com cal AM 03 (28d)	28/01/2003 - 10/02/2003	12h50 - 19h11
475099	AMOSTRA 4	70 - 30 com cal AM 05 (28d)	27/01/2003 - 10/02/2003	12h50 - 19h11
487399	AMOSTRA 5	0 - 100 com cal (28d)	17/02/2003	18h45

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	0.47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	< 0.01	< 0.01	3.79	4.54	1.84	mg/L Al
Acidez Total	< 0.10	4.00	< 0.10	< 0.10	< 0.10	mg/L CaCO ₃
pH	8.92	7.32	10.40	10.90	10.82	—


DIAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento - CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
FONE: (048) 221 - 0603 Laboratório Saneamento
9960 - 0085 Técnico Responsável

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 - 33 **I.E.** 250.450.615

LM. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
457499	AMOSTRA 1	70 - 30 com cal AM 03 (28d)	18/01/2003 - 21/01/2003	10h35 - 18h42
457599	AMOSTRA 2	50 - 50 com cal AM 03 (28d) (1% cimento)	20/01/2003 - 23/01/2003	19h09 - 15h17
457699	AMOSTRA 3	50 - 50 com cal AM 05 (28d)	20/01/2003 - 23/01/2003	19h09 - 13h17
460899	AMOSTRA 4	100 - 0 AM 02 (28d)	20/01/2003 - 27/01/2003	19h09 - 12h38
460999	AMOSTRA 5	0 - 100 com cal AM 03	23/01/2003 - 27/01/2003	13h55 - 12h38

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	0.07	0.34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	14.82	9.71	11.24	4.85	1.53	mg/L Al
Acidez Total	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	mg/L CaCO ₃
pH	10.48	10.71	10.90	8.68	10.86	———


DJAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento - CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
FONE: (048) 221 - 0603 Laboratório Saneamento
9960 - 0085 Técnico Responsável

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 - 33 **I.E.** 250.450.615

I.M. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
456999	AMOSTRA 1	70 - 30 com cal AM 02 (28d)	13/01/2003	19h15
457099	AMOSTRA 2	50 - 50 com cal AM 03 (28d)	16/01/2003 - 18/01/2003	13h30 - 10h25
457199	AMOSTRA 3	50 - 50 com cal AM 04 (28d)	18/01/2003 - 20/01/2003	10h35 - 19h06
457299	AMOSTRA 4	0 - 100 com cal AM 01	20/01/2003 - 21/01/2003	19h06 - 18h42
457399	AMOSTRA 5	0 - 100 com cal AM 02	21/01/2003 - 23/01/2003	18h49 - 13h17

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	2.86	2.71	2.56	0.58	0.61	mg/L Al
Acidez Total	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	mg/L CaCO ₃
pH	10.45	10.56	10.27	11.20	11.23	———


DJAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento - CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
FONE: (048) 221 - 0603 Laboratório Saneamento
9960 - 0085 Técnico Responsável

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 - 33 **I.E.** 250.450.615

I.M. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
449699	AMOSTRA 1	50 - 50 com cal AM 01 (1% cimento)	09/01/2003 - 14/01/2003	13h11 - 16h51
449799	AMOSTRA 2	50 - 50 com cal AM 02 (28d)	13/01/2003 - 16/01/2003	19h15 - 13h23
449899	AMOSTRA 3	50 - 50 sem cal AM 07	10/01/2003 - 16/01/2003	14h57 - 13h23
456799	AMOSTRA 4	100 - 0 com cal AM 01 (28d)	08/01/2003 - 20/01/2003	19h50 - 19h06
456899	AMOSTRA 5	50 - 50 com cal AM 02 (1% cimento)	14/01/2003 - 20/01/2003	16h54 - 19h06

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	< 0.01	< 0.01	2.87	< 0.01	< 0.01	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	2.61	2.76	0.21	1.43	2.61	mg/L Al
Acidez Total	< 0.10	< 0.10	18.0	< 0.10	< 0.10	mg/L CaCO ₃
pH	11.46	11.45	8.68	8.37	10.39	—


DJAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento - CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
FONE: (048) 221 - 0603 Laboratório Saneamento
9960 - 0085 Técnico Responsável

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 - 33 **LE.** 250.450.615

LM. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
447299	AMOSTRA 1	70 - 30 sem cal AM 07	06/01/2003 - 08/01/2003	9h56 - 19h45
447399	AMOSTRA 2	70 - 30 com cal AM 08	08/01/2003 - 10/01/2003	19h50 - 15h04
447499	AMOSTRA 3	70 - 30 sem cal AM 08	08/01/2003 - 10/01/2003	19h50 - 15h04
447599	AMOSTRA 4	70 - 30 com cal AM 09	10/01/2003 - 13/01/2003	15h04 - 19h02
447699	AMOSTRA 5	70 - 30 sem cal AM 09	10/01/2003 - 13/01/2003	15h04 - 19h02

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	0.07	< 0.01	0.23	< 0.01	0.45	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	< 0.01	8.18	< 0.01	8.22	< 0.01	mg/L Al
Acidez Total	12.0	< 0.10	10.0	< 0.10	14.0	mg/L CaCO ₃
pH	8.61	11.83	8.63	12.14	8.25	-----


DJAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento - CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
FONE: (048) 221 - 0603 Laboratório Saneamento
9960 - 0085 Técnico Responsável

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 - 33 **I.E.** 250.450.615

I.M. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
446799	AMOSTRA 1	70 - 30 com cal AM 01 (28d)	08/01/2003 - 13/01/2003	19h50 - 19h02
446899	AMOSTRA 2	50 - 50 com cal AM 06	07/01/2003 - 10/01/2003	8h36 - 14h55
446999	AMOSTRA 3	50 - 50 sem cal AM 06	06/01/2003 - 10/01/2003	9h56 - 14h55
447099	AMOSTRA 4	70 - 30 com cal AM 07	06/01/2003 - 08/01/2003	9h56 - 19h15
447199	AMOSTRA 5	50 - 50 com cal AM 07	10/01/2003 - 13/01/2003	14h57 - 19h02

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	< 0.01	< 0.01	3.62	< 0.01	< 0.01	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	9.20	3.32	< 0.01	7.41	4.34	mg/L Al
Acidez Total	< 0.10	< 0.10	18.0	< 0.10	< 0.10	mg/L CaCO ₃
pH	11.22	11.50	8.61	12.00	11.51	———


DJAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento - CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
FONE: (048) 221 - 0603 Laboratório Saneamento
9960 - 0085 Técnico Responsável

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 - 33 **I.E.** 250.450.615

I.M. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
444299	AMOSTRA 1	70 - 30 sem cal AM 06	02/01/2003 - 06/01/2003	14h35 - 9h51
444399	AMOSTRA 2	50 - 50 com cal AM 05	02/01/2003 - 07/01/2003	14h35 - 8h31
444499	AMOSTRA 3	50 - 50 sem cal AM 05	02/01/2003 - 06/01/2003	14h35 - 9h51
446599	AMOSTRA 4	0 - 100 com cal AM 01	19/12/2002 - 20/12/2002	
446699	AMOSTRA 5	50 - 50 com cal AM 01 (28d)	09/01/2003 - 13/01/2003	13h11 - 19h02

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	0.38	< 0.01	2.72	< 0.01	< 0.01	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	< 0.01	1.79	< 0.01	< 0.01	7.41	mg/L Al
Acidez Total	26.0	< 0.10	32.0	< 0.10	< 0.10	mg/L CaCO ₃
pH	8.13	11.17	8.61	10.78	11.43	———


DJAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento - CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
FONE: (048) 221 - 0603 Laboratório Saneamento
9960 - 0085 Técnico Responsável

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 – 33 **I.E.** 250.450.615

I.M. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
438799	AMOSTRA 1	70 – 30 com cal AM 05	30/12/2002 – 02/01/2003	11h50 – 14h29
438899	AMOSTRA 2	50 – 50 sem cal AM 04	30/12/2002 – 02/01/2003	11h50 – 14h29
438999	AMOSTRA 3	50 – 50 com cal AM 04	30/12/2002 – 02/01/2003	11h50 – 14h29
439099	AMOSTRA 4	água de ensaio	28/12/2002	16h40
444199	AMOSTRA 5	70 – 30 com cal AM 06	02/01/2003 – 06/01/2003	14h35 – 9h51

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	< 0.01	< 0.01	0.15	< 0.01	< 0.01	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	4.11	< 0.01	3.68	< 0.01	2.38	mg/L Al
Acidez Total	< 0.10	18.0	< 0.10	6.00	< 0.10	mg/L CaCO ₃
pH	11.41	7.32	11.72	5.85	12.14	———


DJAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento – CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS – SC
FONE: (048) 221 – 0603 Laboratório Saneamento
9960 – 0085 Técnico Responsável

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 - 33 I.E. 250.450.615

I.M. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
438499	AMOSTRA 1	70 - 30 com cal AM 04	28/12/2002 - 30/12/2002	16h30 - 11h45
438599	AMOSTRA 2	70 - 30 sem cal AM 04	28/12/2002 - 30/12/2002	16h30 - 11h45
437299	AMOSTRA 3	50 - 50 sem cal AM 01	19/12/2002 - 22/12/2002	
437399	AMOSTRA 4	70 - 30 com cal AM 01	19/12/2002 - 22/12/2002	17h00 - 9h00
438699	AMOSTRA 5	70 - 30 sem cal AM 05	30/12/2002 - 02/01/2003	11h50 - 14h29

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	< 0.01	1.59	8.76	< 0.01	0.07	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	2.37	< 0.01	0.32	2.43	< 0.01	mg/L Al
Acidez Total	< 0.10	12.0	26.0	< 0.10	28.0	mg/L CaCO ₃
pH	11.82	7.62	7.99	11.80	7.31	—


DIAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento - CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
FONE: (048) 221 - 0603 Laboratório Saneamento
9960 - 0085 Técnico Responsável

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 - 33 **LE.** 250.450.615

LM. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
437999	AMOSTRA 1	50 - 50 com cal AM 02	23/12/2002 - 26/12/2002	15h05 - 12h20
438099	AMOSTRA 2	70 - 30 sem cal AM 03	25/12/2002 - 28/12/2002	13h33 - 16h25
438199	AMOSTRA 3	70 - 30 com cal AM 03	25/12/2002 - 28/12/2002	13h33 - 16h25
438299	AMOSTRA 4	50 - 50 com cal AM 03	26/12/2002 - 30/12/2002	12h20 - 11h45
438399	AMOSTRA 5	50 - 50 sem cal AM 03	26/12/2002 - 30/12/2002	12h20 - 11h45

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	< 0.01	0.43	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	2.38	< 0.01	2.27	3.90	< 0.01	mg/L Al
Acidez Total	< 0.10	24.0	< 0.10	< 0.10	22.0	mg/L CaCO ₃
pH	11.29	7.30	11.47	11.76	7.47	—


DJAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento - CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
FONE: (048) 221 - 0603 Laboratório Saneamento
9960 - 0085 Técnico Responsável

Fundação do Ensino Técnico de Santa Catarina
Laboratório de Saneamento Básico

Data da emissão: 05 / 05 / 2003

Interessado: Fundação Ensino Engenharia Santa Catarina

Endereço: CTC campus Universitário

Bairro: Trindade

Cidade: Florianópolis / SC

CNPJ 82.895.327 / 0001 - 33 **I.E.** 250.450.615

I.M. 6825-0

DADOS DAS AMOSTRAS

COLETOR : Edinei Rodrigues de Farias

PROTOCOLO	AMOSTRA	ORIGEM	DATA	HORA
437499	AMOSTRA 1	70 - 30 sem cal AM 01	19/12/2002 - 21/12/2002	17h00 - 9h30
437599	AMOSTRA 2	50 - 50 com cal AM 01	19/12/2002 - 21/12/2002	17h00 - 9h30
437699	AMOSTRA 3	70 - 30 com cal AM 02	22/12/2002 - 25/12/2002	17h00 - 13h24
437799	AMOSTRA 4	70 - 30 sem cal AM 02	22/12/2002 - 25/12/2002	17h00 - 13h24
437899	AMOSTRA 5	50 - 50 sem cal AM 02	23/12/2002 - 26/12/2002	15h05 - 12h20

PARÂMETROS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	UNIDADE
Ferro Total	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.38	mg/L Fe
Manganês	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/L Mn
Alumínio	< 0.01	2.27	2.49	< 0.01	0.11	mg/L Al
Acidez Total	28.0	< 0.10	< 0.10	32.0	30.0	mg/L CaCO ₃
pH	7.23	11.59	11.56	7.12	7.37	———


DIAN PORRUA DE FREITAS
Técnico Saneamento - CRQ 13400691

FUNDAÇÃO DO ENSINO TÉCNICO DE SANTA CATARINA
AV. MAURO RAMOS, 950
CENTRO - FLORIANÓPOLIS - SC
FONE: (048) 221 - 0603 Laboratório Saneamento
9960 - 0085 Técnico Responsável