



AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE CINZAS DE FUNDO DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO (RSU) EM CAMADAS DE PAVIMENTO

Igor Nunes Dourado

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Escola
Politécnica, Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Engenheiro

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Rio de Janeiro
Março de 2013

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE CINZAS DE FUNDO DE RESÍDUO SÓLIDO
URBANO (RSU) EM CAMADAS DE PAVIMENTO

Igor Nunes Dourado

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Prof^a. Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.

Prof. Maurício Ehrlich, Ph.D.

Eng^a. Mariluce de Oliveira Ubaldo, M.Sc.

Prof. Antônio Carlos Rodrigues Guimarães, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2013

Dourado, Igor Nunes

Avaliação da Aplicabilidade de Cinzas de Fundo de
RSU em Camadas de Pavimentos / Igor Nunes Dourado

– Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

XI, 113p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Projeto de Graduação - UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de
Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 82-86

1. Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Pavimentação. 3. Cinzas de
Fundo. 4. Cal. 5. Base de Pavimento. 6. Estabilização de solos.

I. Motta , Laura Maria Goretti da. II. Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil.

III. Avaliação da Aplicabilidade de Cinzas de Fundo de
Resíduo Sólido Urbano (RSU) em Camadas de Pavimento

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luis e Sirlei, pelo apoio, exemplo, educação e incentivo durante toda a minha vida, que moldaram meu caráter e ajudaram a me tornar tudo que sou hoje.

À Brisa, minha namorada, por compreender, ouvir e incentivar. Obrigado pelo carinho e por estar comigo em todos os momentos.

À professora Laura Maria Goretti da Motta pelo privilégio de sua orientação, paciência e ensinamentos durante a realização do trabalho. Enfim a todos que de alguma forma me ajudaram, participando direta ou indiretamente, durante a minha longa jornada da graduação.

À Mariluce Ubaldo, pelos conselhos e pelo apoio imensurável sem o qual seria impossível a realização deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório da COPPE/UFRJ, Washington, Thiago, Allan, Leandro, Carlinhos, Luizão, Rafaela, Maiara e Beto, por toda a ajuda na realização dos ensaios.

À Lhoist, pela doação de material para realização do trabalho.

Aos amigos, Renata, Antonio e Yuri, por tornarem a faculdade uma experiência mais agradável.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil

Avaliação da Aplicabilidade de Cinzas de Fundo de Resíduo Sólido Urbano (RSU) em
Camadas de Pavimento
Igor Nunes Dourado
Março de 2013

Orientador: Laura Maria Goretti da Motta.

Curso: Engenharia Civil

A consciência da necessidade de preservação ambiental tem sido cada vez maior. Muitos processos de engenharia têm sido implantados para resolver a questão de disposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU), dentre estes a queima controlada para geração de energia e redução do volume. Este processo gera dois tipos de cinza: a volante e a de fundo. Este estudo visa caracterizar cinzas de fundo (CF) de uma usina, obtidas na combustão de RSU, e avaliar a efetividade de sua aplicação em camadas de pavimento como um destino mais nobre do que a disposição em aterro. Para isto foi testada a mistura da CF a um solo granular inadequado para uso como material de fundação em pavimentos. Realizaram-se ensaios físicos, químicos e mecânicos. Também foi testada adição de 3% de cal calcítica CH-I. Analisou-se o solo puro e misturas de solo-cinza de fundo (20% e 40% de cinzas) e solo-cinza de fundo-cal (20% de cinzas e 3% de cal). As misturas de solo e cinzas de fundo apresentaram comportamento mecânico semelhante ao do solo puro, devido ao baixo grau de pozolanicidade das cinzas de fundo, atuando como melhoria granulométrica somente. A inserção de cinza de fundo influi pouco no módulo de resiliência deste solo, independente do teor de CF utilizado. No entanto, houve diminuição na expansibilidade do material e aumento do CBR com o aumento do teor de cinza de fundo. A adição da cal mostrou nos ensaios considerável aumento no módulo de resiliência comparando ao solo puro e às outras misturas.

Palavras-chave: Cinzas de fundo, RSU, Pavimentos.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Evaluation of the Applicability of MSW Bottom Ashes on Layers of Pavements

Igor Nunes Dourado

MARCH/2013

Advisor: Laura Maria Goretti da Motta

Course: Civil Engineering

The consciousness of the need for environmental preservation has been increasing. Many engineering processes have been implemented to solve the issue of municipal solid waste (MSW) disposal, like the controlled burns for energy generation and volume reduction. This process generates two kinds of ashes: the fly ashes and the bottom ashes. This research is focused on perform a characterization the bottom ashes (BA) of a plant, obtained in the combustion of MSW and evaluate the effectiveness of their application in pavement layers as a nobler destiny than the disposal in landfill. The mixture of inadequate granular soil-bottom ashes was tested as pavement material foundation to perform it. Physical, chemical and mechanical tests were realized. Also was tested the addition of 3% calcitic lime CH-I. It was analyzed the pure soil and mixtures of soil-bottom ashes (20% and 40% of ashes) and soil-lime-bottom ashes (20% ashes and 3% lime). The mixtures of soil and bottom ashes showed mechanical behavior similar to the pure soil, due to the low level of pozzolanicity of the bottom ashes, only acting as granulometric improvement. The insertion of bottom ashes had little influence on the resilience modulus of the soil, independent of the content used of BA. However, there was a significant decrease in expansion of the material, increasing the CBR with the increase of the bottom ash content. The addition of lime showed on the tests a significant increase on the resilience modulus compared to the pure soil and the other mixtures.

Key-words: Bottom ashes, MSW, Pavements

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. Introdução..... | 1 |
| 2. Revisão Bibliográfica..... | 4 |
| 2.1. Evolução histórica da incineração pelo mundo | 4 |
| 2.1.1. Europa | 4 |
| 2.1.2. Estados Unidos | 11 |
| 2.1.3. Brasil | 15 |
| 2.1.3.1. A USINAVERDE | 18 |
| 2.2. Estabilização de solos | 21 |
| 2.2.1. Estabilização Mecânica..... | 22 |
| 2.2.2. Estabilização física | 23 |
| 2.2.3. Estabilização química | 24 |
| 2.2.3.1. Solo-Cimento | 25 |
| 2.2.3.2. Solo-Cal | 27 |
| 2.2.3.3. Solo-Cinza de RSU | 29 |
| 3. Programa Experimental..... | 35 |
| 3.1. Materiais utilizados..... | 35 |
| 3.1.1. Solo | 35 |
| 3.1.2. Cinza de fundo de RSU..... | 36 |
| 3.1.3. Cal..... | 37 |
| 3.2. Misturas ensaiadas | 38 |
| 3.3. Métodos e procedimentos de ensaio | 40 |
| 3.3.1. Caracterização Física | 41 |
| 3.3.1.1. Massa específica real dos grãos..... | 42 |
| 3.3.1.2. Análise Granulométrica | 44 |
| 3.3.1.3. Limites de Atterberg | 44 |
| 3.3.2. Caracterização Química | 45 |
| 3.3.2.1. Dosagem Físico-Química da Cal..... | 45 |
| 3.3.3. Caracterização Mecânica | 47 |
| 3.3.3.1. Ensaio de Compactação | 47 |
| 3.3.3.2. Ensaio de CBR | 48 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.3.3.3. | Ensaio de Módulo de Resiliência | 50 |
| 3.4. | Dimensionamento de pavimento típico..... | 54 |
| 4. | Apresentação dos resultados | 58 |
| 4.1. | Caracterização Física | 58 |
| 4.1.1. | Massa Específica Real dos Grãos..... | 58 |
| 4.1.2. | Limites de Atterberg | 59 |
| 4.1.3. | Análise Granulométrica | 60 |
| 4.1.4. | Classificação SUCS | 62 |
| 4.1.5. | Classificação TRB | 62 |
| 4.2. | Ensaio de Caracterização Química..... | 63 |
| 4.2.1. | Dosagem Físico-Química da Cal..... | 63 |
| 4.3. | Ensaio de Caracterização Mecânica | 65 |
| 4.3.1. | Ensaio de Compactação | 65 |
| 4.3.2. | Ensaio CBR..... | 66 |
| 4.3.3. | Módulo de Resiliência (MR)..... | 67 |
| 4.4. | Dimensionamento de pavimento típico..... | 75 |
| 5. | Considerações finais | 78 |
| 5.1. | Conclusões | 78 |
| 5.2. | Sugestões para pesquisas futuras | 81 |
| | Referencias Bibliográficas | 82 |
| | Anexo A | 87 |
| | Anexo B..... | 90 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1– Percentuais de resíduos incinerados por categoria na UE (Eurostat, 2008) | 7 |
| Figura 2.2 – Exemplo de curvas granulométricas de cinza de fundo de RSU e pó de pedra. 9 | |
| Figura 2.3 –Primeira usina de capital privado dos EUA. (Fonte: cityofames.org) | 14 |
| Figura 2.4 - Divisão regional das disposições dos RSU nos EUA no ano de 2008. (HARREN et al., 2010)..... | 15 |
| Figura 2.5 – Representação da etapa de pré-processamento de RSU na USINAVERDE (SANTOS, 2011) | 19 |
| Figura 3.1 – Amostra do solo utilizado neste trabalho | 36 |
| Figura 3.2 – Amostra de Cinza de Fundo de RSU da USINAVERDE (VIZCARRA, 2010) | 37 |
| Figura 3.3 – Amostra de Cal Calcítica utilizada neste trabalho | 38 |
| Figura 3.4 – Sequencia de preparação da mistura dos materiais neste trabalho..... | 39 |
| Figura 3.5 – Mistura 1 (S80/CF20) deste trabalho | 40 |
| Figura 3.6 – Mistura 2 (S60/CF40) deste trabalho | 40 |
| Figura 3.7 – Picnômetro com amostras cobertas por água destilada para ensaio de massa específica..... | 43 |
| Figura 3.8 – Aquecimento do picnômetro para expulsão do ar entre as partículas | 43 |
| Figura 3.9 – Provetas contendo a mistura ensaiada com água destilada no ensaio físico-químico de dosagem..... | 46 |
| Figura 3.10 – Proвета sendo agitada para homogeneização no ensaio físico-químico de dosagem..... | 46 |
| Figura 3.11 – Compactador mecânico utilizado para moldar os corpos de prova..... | 47 |
| Figura 3.12 – Corpo-de-prova moldado em molde tripartido no compactador mecânico ... | 48 |
| Figura 3.13 – Cilindro imerso com extensômetro instalada para realizar leituras de expansão-ensaio CBR..... | 49 |
| Figura 3.14 – Sequencia de montagem do equipamento triaxial de carga repetida | 51 |
| Figura 3.15 – Modelos clássicos de comportamento resiliente de solos | 53 |
| Figura 3.16 – Outros comportamentos de solos quanto à resiliência | 53 |
| Figura 3.17 – Fluxograma de Desenvolvimento do SisPav (Fonte: FRANCO,2007)..... | 55 |
| Figura 3.18 – Estrutura do Pavimento Típico adotada para análise mecânica-empírica (Fonte: VIZCARRA, 2010)..... | 55 |
| Figura 3.19 – Dados climáticos adotados no SisPav neste trabalho | 56 |
| Figura 3.20 – Características do Tráfego adotado no SisPav para período de projeto de 10 anos neste trabalho | 56 |
| Figura 4.1 – Curvas granulométricas do solo e das misturas analisadas neste trabalho | 60 |
| Figura 4.2 – Comparação entre as granulometrias das misturas e solo puro deste estudo com a faixa granulométrica F para base estabilizada da norma DNIT 141/2010..... | 62 |
| Figura 4.3 – Variação volumétrica percentual em relação a percentagem de cal adicionada à mistura..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4 – Curvas de compactação de solo e das misturas com 20% (com e sem cal) e 40% de cinza de fundo deste estudo. | 66 |
| Figura 4.5 – Resultados do ensaio triaxial de carga repetida para o solo puro e para as misturas de solo-cinza de fundo de RSU realizados neste estudo | 70 |
| Figura 4.6 – Resultados do ensaio triaxial de carga repetida para solo puro e para misturas com 20% de cinza de fundo de RSU, sem cal ou com 3% de cal e 34 dias de cura..... | 71 |
| Figura 4.7 – Resultados do ensaio triaxial de carga repetida para solo puro e para misturas com 20% de cinza de fundo de RSU, sem cal ou com 3% de cal e 61 dias de cura..... | 72 |
| Figura 4.8 – Resultados do ensaio triaxial de carga repetida para solo puro e para misturas com 20% de cinza de fundo de RSU, sem cal ou com 3% de cal e 90 dias de cura..... | 73 |
| Figura 4.9 – Estrutura do Pavimento Típico adotada para análise mecanística-empírica com camada de S60/CF40 como reforço de subleito | 77 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Valores Limite de Emissão de poluente resultantes de incineração da Diretiva 89/369/CE (em mg/m ³ , referidos a 273 K, 101,3 kPa, 11% O ₂ , gás seco) (Serra, 2011) | 5 |
| Tabela 2.2– Emissões finais para grandes unidades para os Combustores de Resíduos Municipais (CRM), com limites para unidades existentes e também para novas unidades. (SANTOS, 2011) | 12 |
| Tabela 2.3 – Limites de emissões para unidades existentes de pequenos Combustores de Resíduos Municipais (30 - 250 t/dia) (SANTOS, 2011)..... | 13 |
| Tabela 2.4 – Propriedades mecânicas das cinzas de fundo de RSU (REIS-BARROS E LOPES, 2006)..... | 31 |
| Tabela 2.5 – Principais constituintes das cinzas de fundo de RSU de Portugal. (REIS-BARROS E LOPES, 2006) | 32 |
| Tabela 2.6 – Composição química dos lixiviados das cinzas de fundo de RSU de Portugal. (REIS-BARROS E LOPES, 2006) | 32 |
| Tabela 3.1 – Quantidades de substâncias solubilizadas na cinza de fundo e limite previsto pela NBR 10004:2004..... | 37 |
| Tabela 3.2 – Descrição dos materiais ensaiados com solo e cinza de fundo | 39 |
| Tabela 3.3 – Níveis de tensões utilizados durante o Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas na etapa de condicionamento (Fonte: Medina e Motta, 2005)..... | 51 |
| Tabela 3.4 – Níveis de tensões utilizados durante o Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas na etapa de obtenção do MR (Fonte: Medina e Motta, 2005)..... | 52 |
| Tabela 4.1 – Número de ensaios realizados neste trabalho | 58 |
| Tabela 4.2 – Resultado do ensaio de massa específica real dos grãos para solo, cinza de fundo e misturas..... | 58 |
| Tabela 4.3 – Valores dos limites de Atterberg para cada amostra ensaiada | 59 |
| Tabela 4.4 – Resultado das análises granulométricas do solo, cinza de fundo e misturas .. | 60 |
| Tabela 4.5 – Índices de classificação SUCS para cada amostra deste estudo | 62 |
| Tabela 4.6 – Índices de classificação TRB para cada amostra..... | 63 |
| Tabela 4.7 - Valores obtidos pelo método de dosagem físico-química para o solo ensaiado neste trabalho | 64 |
| Tabela 4.8 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. | 65 |
| Tabela 4.9 – Valores de expansão e do CBR após 4 dias de imersão em água..... | 67 |
| Tabela 4.10 – Coeficientes do modelo de análise para tensão confinante dos materiais deste estudo | 68 |
| Tabela 4.11 – Coeficientes do modelo de análise para tensão desvio dos materiais deste estudo | 69 |
| Tabela 4.12 – Valores dos coeficientes do modelo composto para cada material ou mistura desta pesquisa | 74 |
| Tabela 4.13 – Valores de Módulo de Resiliencia médio, para $\sigma_d = 0,021$ e para $\sigma_d = 0,412$ deste trabalho, de Vizcarra (2010) e de Lopes (2011) | 75 |

| | |
|--|----|
| Tabela 4.14 – Valores arredondados das espessuras dimensionadas pelo SisPav para um tempo de vida de 10 anos para as misturas S77/CF20/C3 deste trabalho em diferentes tempos de cura | 76 |
| Tabela 4.15 – Valores arredondados das espessuras dimensionadas pelo SisPav para um tempo de vida de 10 anos para as misturas S77/CF20/C3 em diferentes tempos de cura na camada de base e misturas S60/CF40 no subleito | 77 |

1. Introdução

Ao longo dos últimos anos, a produção de lixo vem crescendo a uma proporção maior do que o crescimento populacional no mundo. De acordo com Santos (2008), o problema da geração e acúmulo de lixo se evidencia com mais clareza nas áreas urbanas devido à concentração de numerosas fontes geradoras e da necessidade da convivência da população com as diversas etapas necessárias à realização da limpeza urbana. O processo de degradação ambiental inicia-se com a produção. Da extração da matéria-prima até o descarte final do produto (consumido e tornado lixo), detectam-se procedimentos de alto impacto ambiental na natureza. Para agravar ainda mais a situação, o padrão vigente de produção e consumo, alavancado por um marketing excessivamente agressivo, induz as pessoas a uma necessidade de consumo extremo e, com isso, a intensificação da degradação ambiental.

Em 2011, de acordo com estudo feito pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) – divulgado através da publicação Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – o Brasil produziu 61,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, registrando um crescimento de 1,8% em relação a 2010, número superior ao índice de crescimento populacional urbano apurado no mesmo período que foi de 0,9%. O levantamento também aponta que a média de quantidade de lixo gerado por pessoa no país foi de 359 kg em 2009 para 382 kg em 2011.

O percentual de resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados em 2011 também aumentou 2,5% em relação ao ano anterior. Isto representa que 55,5 milhões de toneladas de RSU foram coletadas das 61,9 milhões de toneladas geradas no ano.

Todo esse resíduo coletado leva a um novo problema, que é o destino que deve ser dado a eles. Apesar dos recentes avanços, o Brasil ainda encontra algumas dificuldades em desenvolver este aspecto. A quantidade de RSU encaminhada para destinos inadequados ainda é alta, sendo enviadas para lixões ou aterros controlados, os quais não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações. Em 2011, dos 55,5 milhões de toneladas coletados, 23,3 milhões foram encaminhados para destinos inadequados, o que representa uma diminuição em números relativos (42,44% para 41,94%) em relação a 2010, mas um aumento em números absolutos, 23 milhões para 23,3 milhões (ABRELPE, 2011).

A incineração de resíduos sólidos urbanos é um processo de tratamento que envolve a combustão das substâncias orgânicas presentes na matéria que compõe os resíduos. De acordo com Figueiredo et al. (2002), a incineração produz grande quantidade de cinzas de fundo (também denominada por alguns autores como “escória”) e cinzas volantes, gerando respectivamente 300kg e 30kg por tonelada incinerada.

Através da queima, o volume e a massa do resíduo diminuem consideravelmente, em até 98% do volume original, dependendo da constituição do material incinerado, além da diminuição de suas características nocivas. Com o desenvolvimento de novas tecnologias e a busca de alternativas tanto para a geração de energia quanto para o destino do lixo, a incineração também se tornou capaz de aproveitar o potencial energético contido nos resíduos até então não aproveitados, gerando energia elétrica/térmica a partir do processo de queima do RSU, mais conhecido como tecnologia Waste-to-Energy (SANTOS, 2011).

Quando da queima do RSU, são gerados além das cinzas, calor e gases provenientes da incineração. As cinzas, depois do processo, se dividem em cinza de fundo, que se concentram no fundo do forno por serem mais pesadas e de granulometria mais grosseira, e cinza volante, partículas finas que ficam em suspensão nos gases da combustão. O calor é recuperado para geração de energia. Os gases devem ser tratados para que as substâncias nocivas presentes nele alcancem taxas de concentração que não prejudiquem a qualidade do ar quando dispersados na atmosfera.

Outro problema proveniente do aumento populacional e do desenvolvimento industrial no mundo é a necessidade de investimentos cada vez maiores em infraestrutura logística para escoamento de pessoas e de produção para abastecimento, tanto do mercado interno quanto do externo.

Em resenha do livro Caminhos do Brasil, Eloir Faria afirma que o rodoviarismo, consolidado no Brasil na década de 1950, trouxe consigo a necessidade da implantação de uma malha rodoviária, que ainda era incipiente em relação aos países desenvolvidos, para conectar as áreas de maior industrialização e suprir a demanda de melhor qualidade para atender o aumento no número de automóveis devido à expansão da indústria automobilística.

Por essas razões, é de suma importância o desenvolvimento de tecnologias mais eficazes para construção de pavimentos visando diminuir os custos de transporte associados, mantendo um nível adequado de qualidade. Porém, custo e qualidade deixaram de ser os

únicos fatores preponderantes para a aceitabilidade da técnica de pavimentação para o público em geral. O enfoque dado a uma boa relação de novas tecnologias com o meio ambiente ganhou força e quanto mais uma tecnologia puder combinar desempenho com consciência ambiental, melhor ela será aceita no mercado e provavelmente mais rentável será para seus desenvolvedores.

A incineração diminui massivamente o problema do descarte devido à diminuição do tamanho e peso dos resíduos, mas não o resolve de forma definitiva, pois é necessário encontrar um destino para as cinzas de RSU produzidas pelo processo de incineração. A disposição final é usualmente feita em aterros, no entanto tem-se buscado alternativas para não sobrecarregar ainda mais os aterros e também para encontrar uma forma de utilizar as cinzas que seja funcional e benéfica para a sociedade, agregando valor ao seu descarte. Por isso, estudos tentam provar se há a possibilidade de usar cinzas de RSU em estabilização de solos para uso em camadas de pavimentos. É preciso garantir que a presença de uma certa proporção de cinza não prejudique a qualidade do pavimento, e se possível também o beneficie da presença das cinzas em sua composição. Para isso é necessário conhecer as propriedades dos materiais compostos por solos e cinzas que agem conjuntamente, realizando ensaios de laboratório com o objetivo de auxiliar a compreensão da forma como as misturas respondem quando solicitadas.

Neste contexto, o desenvolvimento de tecnologias mais baratas para pavimentos e de descarte dos resíduos de forma adequada, dois problemas comuns para a sociedade moderna, podem ser tratados em conjunto. O presente trabalho visa atuar nas duas frentes, obtendo melhor compreensão de como as misturas de solo e cinzas de fundo de RSU se comportam, para que as obras de construção de pavimentos de rodovias possam se tornar um destino mais usual para elas, fazendo com que as cinzas deixem de ser rejeitos para se tornarem uma alternativa barata de material de construção de pavimentos. Em suma, este trabalho tem por objetivo avaliar a viabilidade da introdução das cinzas de fundo de RSU em mistura com um solo para uso nas camadas inferiores do pavimento. A avaliação das características mecânicas da mistura solo-cinza de fundo confirmará se estas podem ser uma alternativa para deposição final das cinzas sem haver prejuízo às condições iniciais do solo e também verificando a possibilidade do solo se beneficiar da presença das cinzas. Essa avaliação será feita através da realização e interpretação de ensaios físicos, químicos e mecânicos.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Evolução histórica da incineração pelo mundo

A gestão de resíduos vem se modernizando e assumindo um papel crucial para amortizar os impactos ambientais causados pela crescente industrialização. A legislação no tocante a esse tema vem acompanhando esta evolução e a técnica de incineração, como uma das alternativas para tratamento de RSU, não foi ignorada. Com o desenvolvimento de tecnologias, os incineradores tem conseguido cumprir as metas estabelecidas pela legislação ambiental no Brasil e no mundo, se tornando uma realidade como opção do tratamento de lixo. Uma breve revisão deste panorama está apresentada a seguir.

2.1.1. Europa

Analisando a incineração em âmbito internacional, vê-se na Europa, segundo o Eurostat, uma estratégia de desenvolvimento sustentável com seu sexto programa de ação em matéria de ambiente, que identifica a prevenção e a gestão de resíduos como uma prioridade e sublinham a relação entre a utilização eficaz dos recursos e a produção juntamente com a gestão de resíduos. O objetivo da política da União Européia neste domínio consiste em dissociar a utilização de recursos e a produção de resíduos do crescimento econômico, assegurando, ao mesmo tempo, que o consumo sustentável não exceda a capacidade ambiental.

A abordagem da União Européia relativa à gestão dos resíduos se assenta em três princípios: prevenção da geração de resíduos, reciclagem e reutilização, e melhoria da eliminação final e do controle. A prevenção de geração de resíduos pode ser alcançada através de tecnologias mais limpas, concepção ecológica ou modelos de produção e padrões de consumo mais eficazes do ponto de vista ecológico. A prevenção e reciclagem de resíduos, que incide na tecnologia dos materiais, pode também reduzir o impacto ambiental dos recursos que são utilizados, limitando a extração e a transformação de matérias primas durante os processos de produção. Sempre que possível, os resíduos que não podem ser reciclados ou reutilizados devem ser incinerados de forma segura, visto que podem resultar em emissões de poluentes atmosféricos perigosos se não for adequadamente regulamentada. A deposição em aterro deve ser utilizada apenas como último recurso, pois estes ocupam

muito espaço e podem causar poluição da atmosfera, da água e do solo. Estes dois métodos necessitam de controle estrito devido ao seu potencial para causar danos ambientais graves.

Na União Europeia, a legislação que aborda diretamente o tema de emissões de incineração de lixo tem sua pedra fundamental em 1984, com a diretiva 84/360/CEE que determinava que a exploração das instalações de incineração de resíduos seria submetida à autorização prévia de autoridades competentes que garantiria que fossem tomadas as medidas adequadas para controle da poluição atmosférica. Cinco anos mais tarde seria implantada a diretiva 89/369/CEE, que fixa VLEs (Valores Limites de Emissão) para um conjunto de poluentes, exemplificados na Tabela 2.1, e determina um requisito de controle de emissões de dioxinas e furanos – compostos químicos tóxicos e possivelmente cancerígenos – para evitar contaminação, aplicável a instalações com autorização de exploração concedida após a data de 1º de dezembro de 1990. Esta foi complementada por outra diretiva do mesmo ano (Diretiva 89/429/CEE) que estende a aplicação de requisitos semelhantes às instalações já existentes num prazo de 7 a 11 anos, dependendo da capacidade (SERRA, 2011).

Ainda abordando a questão do lixo, foi aprovada a diretiva 94/67/CE, que tratava da incineração de resíduos perigosos e que estabelecia “medidas e procedimentos que previnam ou, quando tal não for possível, reduzam ao mínimo os efeitos negativos no ambiente, em especial a poluição do ar, do solo e das águas superficiais e subterrâneas, bem como os riscos para a saúde das pessoas, resultantes da incineração de resíduos perigosos e, para o efeito, criar e manter condições de exploração e valores-limite de emissão adequados para as instalações de incineração de resíduos perigosos na Comunidade.”

Tabela 2.1 – Valores Limite de Emissão de poluente resultantes de incineração da Diretiva 89/369/CE (em mg/m³, referidos a 273 K, 101,3 kPa, 11% O₂, gás seco) (Serra, 2011)

| Poluente | Capacidade < 1 t/h | Capacidade 1-3 t/h | Capacidade > 3 t/h |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Poeiras totais | 200 | 100 | 30 |
| Pb+Cr+Cu+Mn | - | 5 | 5 |
| Ni+As | - | 1 | 1 |
| Cd+Hg | - | 0,2 | 0,2 |
| HCl | 250 | 100 | 50 |
| HF | - | 4 | 2 |
| SO ₂ | - | 300 | 300 |
| CO | 100 | 100 | 100 |
| COT | 20 | 20 | 20 |

Revogando as diretivas anteriores, a Diretiva 2000/76/CE estendeu o âmbito de atuação da legislação à incineração de resíduos perigosos e à co-incineração, que consiste no aproveitamento dos fornos das fábricas de cimento e das suas altas temperaturas (entre 1450 e 2000°C), para a queima dos resíduos perigosos (tais como solventes de limpeza, solventes de indústria químicas, tintas, etc.), com a produção simultânea de cimento. A diretiva estendeu limites para prevenção à poluição resultante da contaminação do solo e águas superficiais ou subterrâneas, não apenas das emissões atmosféricas. Além disso, a diretiva contemplava os avanços conquistados em termos de controle de emissões, buscando integrá-los à legislação que entraria em vigência (SERRA, 2011).

Pelo aspecto da concessão de licenças pode-se dizer que estas tiveram modificações em seus requisitos, especificando as categorias e quantidades de resíduos de forma a minimizar a produção residual. A concepção das instalações teve de ser planejada de forma que os gases resultantes da incineração atinjam no mínimo 850°C, mesmo em condições desfavoráveis, por pelo menos 2 segundos e na presença de ao menos 6% de oxigênio. No caso de incineração de resíduos perigosos com um teor superior a 1% de substâncias orgânicas halogenadas, a temperatura deverá atingir pelo menos 1.100°C.

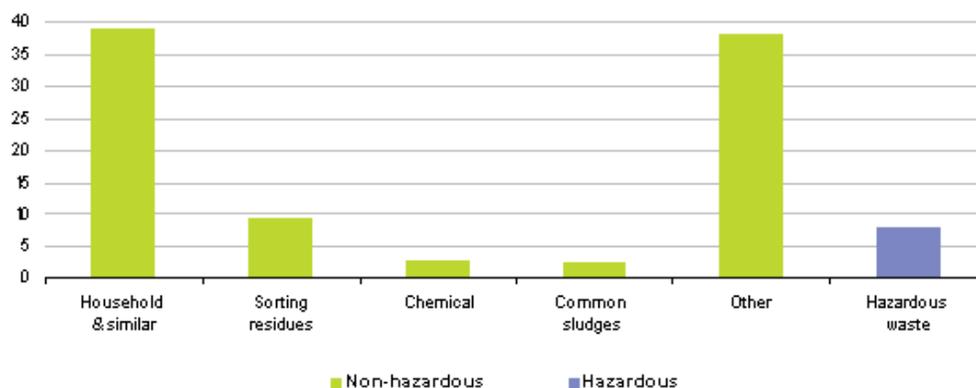
O transporte e armazenamento na forma de poeiras ou resíduos secos deve ser feito em recipiente fechado de forma a evitar que sejam dispersos no ambiente.

Segundo Van Kote (2012), a ascensão da incineração na União Europeia foi reforçada pela diretiva 2008/98/CE sobre o lixo, que estabelece uma hierarquia dos tratamentos a qual os Estados-membros do bloco devem obedecer e prega o uso da incineração com certo grau de eficiência do ponto de vista energético. Ela coloca no topo a prevenção, seguida da reutilização, da reciclagem, do aproveitamento energético e, por fim, da eliminação. O uso de aterros pertence a essa última categoria, ao passo que a incineração pode ser incluída no aproveitamento, desde que o rendimento energético ultrapasse 60% nas instalações que datam de antes de 2009, e 65% no caso das mais recentes.

Em novembro de 2010 foi aprovada a Diretiva 2010/75/EU, a mais recente em relação à incineração de resíduos, relativa às emissões industriais (prevenção e controle integrados da poluição). Ela junta na mesma diretiva os requisitos em termos de proteção ambiental para diversas áreas de atividade industrial, porém seguiu sem alterações relevantes quanto aos Valores Limites de Emissão (VLE) em relação à Diretiva 2000/76/CE. Ficou

determinado que a comissão europeia analise a necessidade de fixar ou alterar VLEs fixados para grandes instalações tendo em conta a atualização dos documentos de referência MTD (Melhores Técnicas Disponíveis) relevantes. Os incineradores que os utilizam são muito menos perigosos à saúde do trabalhador e ao meio ambiente e seus gases tratados são lançados, por vezes, em condições melhores do que o ar na atmosfera. Começará a substituir definitivamente as diretivas anteriores a partir de Janeiro de 2014 (SERRA, 2011).

A Figura 2.1 apresenta uma análise dos resíduos incinerados com recuperação energética no ano de 2008. De um total de 129 milhões de toneladas de resíduos incinerados na UE-27, 38,9 % eram compostos de resíduos domésticos e similares (household & similar). A triagem de resíduos (sorting residues) contribuiu com 9,6 % da quantidade total de resíduos incinerados, os resíduos químicos (chemical) com 2,9 % e as lamas comuns (common sludges) com 2,5 %. Os resíduos perigosos (hazardous waste) representaram 8,1 % do total (cerca de 10,5 milhões de toneladas). É de se notar que a categoria “diversos” (other), com 38,1 %, não pode ser apresentada em maior detalhamento, devido ao grau de repartição limitado exigido pelo regulamento sobre estatísticas de resíduos; no entanto, esta categoria inclui os resíduos de madeira e outros resíduos da biomassa.



Source: Eurostat (online data code: env_w astrt)

Figura 2.1– Percentuais de resíduos incinerados por categoria na UE (Eurostat, 2008)

O Eurostat, agência europeia de estatísticas, apurou que a quantidade total de resíduos incinerados aumentou de forma constante entre 2004 e 2008, registrando um acréscimo de 21 milhões de toneladas (19,6 % globalmente). Cerca de metade do aumento total pode ser atribuído à Alemanha, onde a aplicação da proibição de descarte em aterros para os RSU não

tratados deu origem a um aumento considerável da valorização energética dos resíduos.

A participação da incineração no tratamento de lixo doméstico e similares nos países da União Europeia passou de 13,5% em 1996 para 22% em 2010, segundo dados do Eurostat. Praticamente desconhecido na área do Leste Europeu, esse modo de tratamento é o líder em alguns países: 54% na Dinamarca, 49% na Suécia, 39% na Holanda e 38% na Alemanha, países que, constam entre os mais bem-sucedidos em termos de reciclagem, mas que abandonaram quase que totalmente o uso de aterros sanitários. A França é exceção, com 34% de incineração, mas 31% de uso de aterros sanitários e desempenhos medíocres em reciclagem.

A ideia ainda enfrenta alguma resistência de opositores, como a associação internacional Aliança Global por Alternativas à Incineração (GAIA, sigla em inglês), por acreditarem que, como os incineradores devem funcionar em plena potência durante seu tempo de vida útil (três ou quatro décadas) para serem rentáveis, eles fazem um papel de "aspirador de lixo" e, portanto, não contribuem para a melhoria da coleta seletiva e da reciclagem, o que não resolveria o problema do esgotamento e uso abusivo das fontes de recursos naturais para a produção industrial.

Favorável ao desenvolvimento da reciclagem e "ao uso de aterros em proximidades de quantidades residuais" de lixo doméstico, o Cniid (sigla francesa para "Centro Nacional de Informação Independente sobre os Resíduos") se recusa a classificar a energia produzida pelo lixo como uma energia renovável, como a legislação europeia permite fazer até certo ponto. Por estimar que a incineração emita grandes quantidades de gás carbônico, ele pede para que ela seja submetida a "uma contribuição energia-clima", uma proposta evidentemente combatida pelo SVDU (sigla francesa para "Sindicato Nacional de Tratamento e de Aproveitamento de Resíduos Urbanos"), que afirma que a incineração na verdade emite menos gases de efeito estufa que os combustíveis fósseis, mas reconhece que os desempenhos energéticos nessa modalidade ainda são medíocres (VAN KOTE, 2012).

O problema do destino para o produto final das incinerações tem encontrado uma alternativa de solução em projetos de pavimentação de estradas. De acordo com Reis-Barros e Lopes (2006), a indústria da construção de estradas necessita, só na Europa, de mais de 2,5 milhões de toneladas de agregados minerais, que podem ser substituídos parcialmente por cinzas de fundo, diminuindo-se, simultaneamente, a exploração de novas pedreiras.

Paralelamente, pressões ambientais crescentes dificultam cada vez mais a exploração de novas pedreiras e a extração de agregados aluvionares, como a retirada de areias de rios. Urge assim encontrar soluções alternativas, constituindo a valorização dos resíduos em uma via com grandes vantagens.

Para mostrar esta possibilidade de uso da cinza de fundo em substituição ao pó de pedra, por exemplo, o autor do presente trabalho resolveu ilustrar, neste ponto, somente a característica granulométrica destes dois materiais como informação inicial. Para efeito de comparação, foram montadas na Figura 2.2 as curvas granulométricas de uma cinza de fundo e de um pó de pedra para confirmar a possibilidade de substituição do pó de pedra pela cinza de fundo como agregado. A curva da cinza de fundo foi obtida de Vizcarra (2010) e a do pó de pedra foi obtida de Prigol (2010).

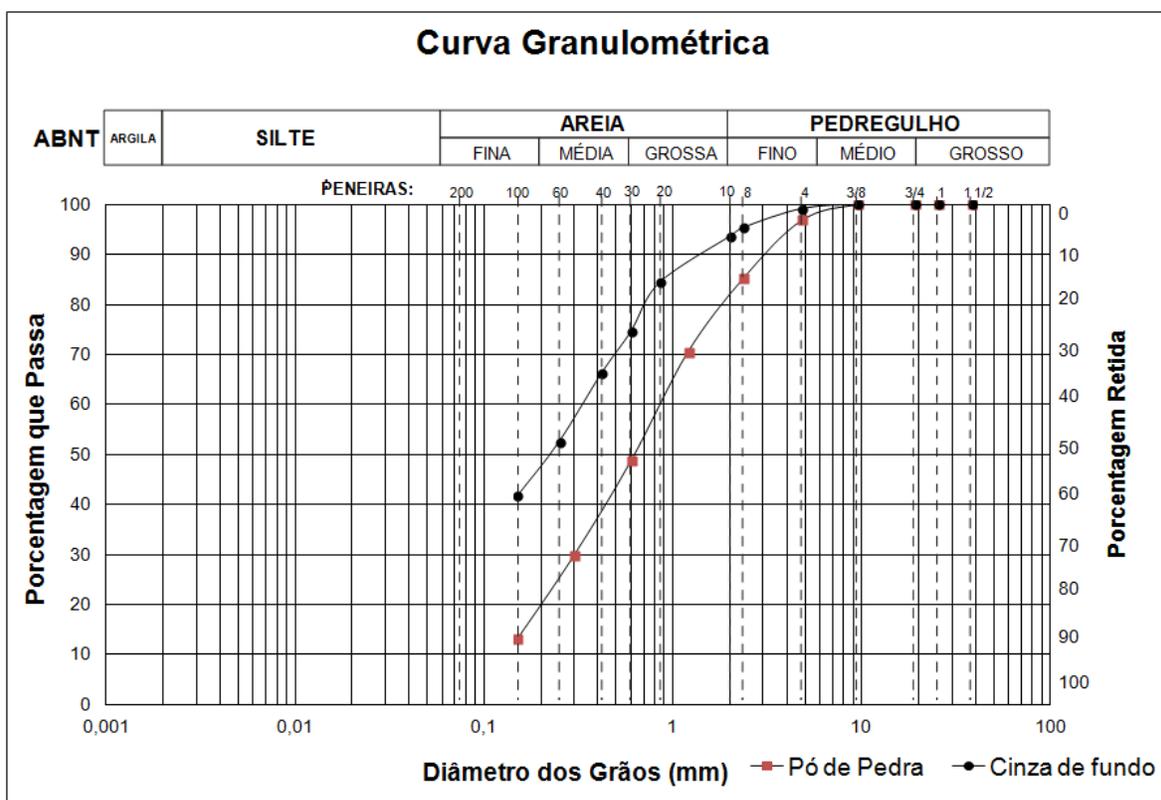


Figura 2.2 – Exemplo de curvas granulométricas de cinza de fundo de RSU e pó de pedra

Devido à exaustiva exploração das fontes de materiais tradicionais, existe uma pressão crescente no sentido de incrementar a utilização de materiais alternativos em aplicações de construção civil tais como estradas, que consomem enormes volumes de solos

e agregados. Esta situação conduz, por um lado, à redução da quantidade de agregados naturais que têm de ser usados em estradas e possibilita, por outro, que materiais alternativos sejam usados ao invés de serem enviados como rejeitos para aterro sanitário. A maioria dos países europeus aplicam taxas para a deposição em aterro e exploração de agregados naturais, como forma de encorajar o uso de materiais alternativos. Apesar destas medidas, o uso de materiais alternativos na construção de estradas é ainda baixo. Tal situação está relacionada, por um lado, com a ideia de que estes materiais são resíduos e por isso inferiores e por ainda subsistirem preocupações relacionadas com o comportamento mecânico e ambiental destes materiais.

Ainda segundo dados divulgados por Reis-Barros e Lopes (2006), na Suécia são gerados cerca de 3 milhões de toneladas de resíduos sólidos, conduzindo a uma produção anual de 340.000 t de cinzas de fundo, que são usadas, na sua totalidade, como sub-base e base em estradas e em aterros.

No Reino Unido, são produzidas 250.000 t de cinza de fundo por ano, tendo ocorrido apenas aplicações localizadas em quantidades desconhecidas (REIS-BARROS e LOPES, 2006).

Na Alemanha, das 2.600.000 t de cinzas produzidas anualmente na valorização energética de resíduos, 1.800.000 t (69%) são utilizadas na construção de estradas (REIS-BARROS e LOPES, 2006).

Na Finlândia, a incineração gera anualmente aproximadamente 95 mil toneladas de cinzas de fundo, das quais 80% são usadas em terraplenagens (REIS-BARROS e LOPES, 2006).

Na Dinamarca são produzidas anualmente cerca de 420.000 t de cinzas de fundo a partir da queima de RSU e resíduos similares. As cinzas de fundo são processadas de forma que sejam removidos os metais da sua composição e para serem preparadas para a utilização final. Cerca de 80% são usadas em aplicações de Engenharia Civil. Consideram possível a utilização das cinzas de fundo em revestimento asfáltico a quente ou a frio ou tratamentos superficiais e, eventualmente, a utilização em estruturas e em arranjos paisagísticos. Embora seu uso seja limitado a aterros e enchimentos, as cinzas de fundo são geralmente aplicadas em base ou sub-base granulares desde o início dos anos 1980 (REIS-BARROS e LOPES, 2006).

Na França, grande parte dos resíduos sólidos é incinerada e das 3.000.000 t de cinza de fundo produzidas anualmente, aproximadamente 67% delas são utilizadas como agregados para construção de pavimentos (REIS-BARROS e LOPES, 2006).

Na Holanda, os aspectos ambientais desta política estão cobertos no Regulamento para Materiais de Construção. Este regulamento permite um impacto marginal na qualidade do solo ao longo de um período de 100 anos, existindo critérios que têm de ser cumpridos dentro deste plano. Na Holanda são produzidas 800.000 t/ano de cinzas de fundo, usadas na sua totalidade em camadas de base granular e aterros (REIS-BARROS e LOPES, 2006).

Em Portugal, só no ano 2000, foram produzidos cerca de 4.300.000 toneladas de resíduos, dos quais cerca de 20% foram incinerados (930 mil toneladas), originando cerca de 171 mil toneladas em cinzas de fundo que normalmente são depositadas em aterro (REIS-BARROS e LOPES, 2006).

2.1.2. Estados Unidos

De acordo com Santos (2011), as usinas de incineração de RSU enfrentaram grande oposição nos EUA, pois em seus primeiros anos de funcionamento elas não realizavam separação de materiais perigosos e os materiais recicláveis antes da queima, o que era nocivo ao trabalhador e ao ambiente pela falta de controle dos gases emitidos no processo de combustão. Mesmo nessas condições seus operadores continuavam a operar a queima dos resíduos sem levar em consideração a qualidade do ar e do que era lançado nele até 1967, quando o US Clean Air Act, lei federal composta de um conjunto de diretrizes destinadas a controlar a poluição do ar, foi aprovado no país.

A legislação do país dedica à incineração de resíduos alguns pontos no Code of Federal Regulations (CFR) ou Código de Regulamentos Federais, que estabelece uma padronização das regras adotadas pelas agências federais. Os padrões aceitáveis de emissão são determinados pelo item 40CFR60, tendo sido promulgados pela primeira vez em 1995, porém somente no ano 2000 foram postos em prática. As seções 111 e 129 do Clean Air Act (CAA) dos EUA prevêm que esses padrões e limites de emissões para fontes fixas sejam revisados a cada cinco anos. De acordo com Santos (2011), a seção 129 do *Clean Air Act*, intitulada como “Combustão de Resíduos Sólidos”, exige que a US EPA (Agência de Proteção Ambiental Americana) desenvolva e adote Padrões de Desempenho para Novas

Fontes (*New Source Performance Standards – NSPS*) e diretrizes de emissão para as unidades de incineração de resíduos sólidos, nos termos da seção 111 e 129 do CAA.

A seção 111(b) do CAA é específica sobre as emissões das novas unidades de Combustores de Resíduos Municipais (CRM), já a seção 111(d) do CAA é específica sobre as emissões de unidades de Combustores de Resíduos Municipais já existentes.

Na Tabela 2.2, proveniente do item 40CFR60 do Código de Regulamentos Federais, estão apresentados alguns poluentes e seus respectivos valores de emissão aceitáveis revisados na atualização de maio de 2006, para incineradores novos e já existentes.

As unidades de incineração de resíduos municipais com grande capacidade de processamento (maior que 250 toneladas por dia) têm suas diretrizes de emissão regulamentadas pelo NSPS (*New Source Performance Standards*), padrão de controle de emissão autorizado na seção 111 do CAA pela EPA. Já as unidades de incineração de resíduos municipais de pequeno porte (com capacidade de queimar entre 30 e 250 toneladas por dia) são regulamentadas pelo código 40CFR62 de 31 de janeiro de 2003, outro plano federal da EPA para controle de emissões de poluentes só para estes casos. Na Tabela 2.3, proveniente do item 40CFR62, estão apresentados alguns dos limites de emissões de poluentes previstos para unidades de pequeno porte.

Tabela 2.2– Emissões finais para grandes unidades para os Combustores de Resíduos Municipais (CRM), com limites para unidades existentes e também para novas unidades. (SANTOS, 2011)

| Poluente | Limite de emissão para unidades existentes de CRMs^a | Limite de emissão para novas unidades de CRMs |
|---------------------------------------|---|--|
| Dioxina/Furano | 30 ng/m ³ a 35 ng/m ³ padrão seco | 13 ng/m ³ padrão seco |
| Cádmio (Cd) | 35 µg/m ³ padrão seco | 10 µg/m ³ padrão seco |
| Chumbo (Pb) | 400 µg/m ³ padrão seco | 140 µg/m ³ padrão seco |
| Mercúrio (Hg) | 50 µg/m ³ padrão seco ou 85% de redução de emissão | 50 µg/m ³ padrão seco ou 85% de redução de emissão |
| Material Particulado (MP) | 25 mg/m ³ padrão seco | 20 mg/m ³ padrão seco |
| Ácido clorídrico (HCl) | 29 ppm/m ³ padrão seco ou 95% de redução da emissão | 20 ppm/m ³ padrão seco (30 mg/Nm ³) ou 95% de redução da emissão |
| Dióxido de enxofre (SO ₂) | 29 ppm/m ³ padrão seco ou 75% de redução da emissão | 30 ppm/m ³ padrão seco (85 mg/Nm ³) m ou 80% de redução da emissão |
| Óxidos nitrosos (NO _x) | Varia de acordo com o tipo de combustor | 180 ppm de volume seco e 150 ppm de volume seco (305 mg/Nm ³) após do primeiro ano de operação |

Tabela 2.3 – Limites de emissões para unidades existentes de pequenos Combustores de Resíduos Municipais (30 - 250 t/dia) (SANTOS, 2011)

| Poluente | Limite de emissão para unidades existentes de “pequenos” CRMs. |
|---------------------------------------|---|
| Dioxina/Furano | 30 ng/m ³ padrão seco para unidades sem o sistema de controle de emissões baseado no precipitador eletroestático - ou – 60 ng/m ³ padrão seco para unidades que utilizem este sistema |
| Cádmio (Cd) | 40 µg/m ³ padrão seco |
| Chumbo (Pb) | 490 µg/m ³ padrão seco |
| Mercúrio (Hg) | 80 µg/m ³ padrão seco ou 85% de redução de emissão |
| Opacidade | 10 % |
| Material Particulado (MP) | 27 mg/m ³ padrão seco |
| Ácido clorídrico (HCl) | 29 ppm/m ³ padrão seco ou 95% de redução da emissão |
| Dióxido de enxofre (SO ₂) | 29 ppm/m ³ padrão seco ou 75% de redução da emissão |
| Cinzas fugitivas | Emissão visível não mais de 5% |

Em um breve histórico da incineração nos EUA, pode-se ressaltar a primeira unidade de incineração de lixo de grande porte para transformação em energia (conhecidas como Waste-to-Energy), inaugurada em agosto de 1975 em Ames, Iowa, utilizando capital privado em sua construção (Figura 2.3). Mesmo sofrendo alguns problemas operacionais, compreensível pelo fato de se tratar de uma nova tecnologia, a unidade conseguiu se adaptar às características do RSU. Em outubro deste mesmo ano foi construída a primeira usina de incineração bem sucedida do ponto de vista comercial na cidade de Saugus, Massachussets.

No âmbito legislativo, em 1978 foi aprovado a Lei Regulamentadora das Políticas de Concessionárias Públicas (Public Utility Regulatory Policies Act - PURPA), que permitiu que novos projetos de incineração de lixo para transformação em energia fossem financiados. Este ato tornou possível que essa forma de geração de energia se tornasse economicamente viável já que os projetos puderam encontrar compradores para a eletricidade gerada (COMBS, 2008).



Figura 2.3 –Primeira usina de capital privado dos EUA. (Fonte: cityofames.org)

Em 1980 a Lei de Segurança Energética (Energy Security Act) disponibilizou fundos para projetos com uso de energia de biomassa, o que garantiu empréstimos para projetos de geração de energia baseado em combustão de RSU, além de autorizar pesquisas para desenvolvimento da viabilidade comercial desta técnica (COMBS, 2008).

Em 1986 a Lei de Reforma Tributária (Tax Reform Act), beneficiou as usinas de incineração estendendo os créditos fiscais para essas instalações por mais 10 anos, porém também prejudicou as usinas de incineração financiadas com capital de desenvolvimento industrial, pois revogou sua isenção de impostos (COMBS, 2008).

Com a diminuição no investimento e a dificuldade em atingir as exigências, o número de usinas de incineração WTE passou de 186 unidades em 1990 para 89 em 2007, totalizando mais de 250 incineradoras desativadas desde a década de 80 até então, devido ao sucateamento de boa parte delas, pois ficaram ultrapassadas, além das pressões políticas e ambientais sofridas. Isto contribuiu para desestimular o desenvolvimento da técnica e fez com que nenhuma usina WTE fosse construída de 1996 a 2007 como consequência. A mudança nesse cenário começou em 2004, quando o RSU passou a ser considerado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos uma fonte de energia renovável devido a predominância de biomassa em sua composição (PSOMOPOULOS et. al, 2009).

Os últimos registros apurados no ano de 2010, de acordo com dados de Rosenthal (2010), dão conta de que existem 87 usinas waste-to-energy operantes atualmente no país. Segundo a WTERT, estas usinas processam 28 milhões de toneladas de RSU por ano gerando aproximadamente 15 TWh de energia elétrica e toneladas de cinzas.

Atualmente nos EUA, de acordo com Reis-Barros e Lopes (2006), as cinzas de fundo e as cinzas volantes resultantes da incineração dos RSU são geralmente combinadas numa única corrente. A maioria das cinzas provenientes da incineração é utilizada na cobertura de aterros de RSU ou em misturas de concreto asfáltico. Das 8 megatoneladas de cinzas provenientes da valorização energética de resíduos, pequenas quantidades foram utilizadas, a maioria em estradas e em cobertura de aterros sanitários e algumas em mistura asfáltica. Na Figura 2.4, observa-se a destinação dada ao lixo em cada região dos EUA. Observa-se que grande parte ainda destina seu lixo para aterros (landfilling), porém, como grande parte das usinas de incineração do país estão situadas na costa leste, grande parte do aproveitamento de queima de lixo para geração de energia (waste-to-energy) acontece nesta região.

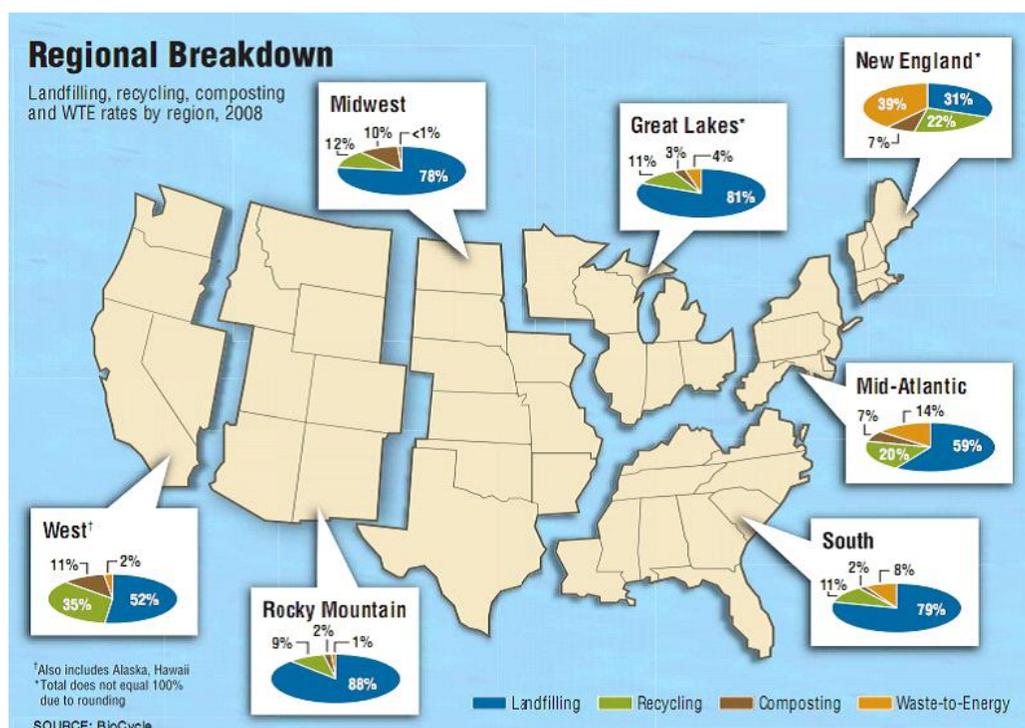


Figura 2.4 - Divisão regional das disposições dos RSU nos EUA no ano de 2008. (HARREN et al., 2010)

2.1.3. Brasil

De acordo com Menezes et al. (2000), os primórdios da experiência brasileira no ramo de incineração de resíduos datam de 1896, quando foi instalado um incinerador em Manaus para tratar de 60 toneladas de lixo doméstico por dia, e que foi desativado em meados do século XX por problemas de manutenção.

A partir de 1970 foi iniciada a fase de implantação de incineradores especificamente desenvolvidos para o tratamento de resíduos especiais, como os resíduos aeroportuários, hospitalares, industriais e outros perigosos. Nesta fase, entre outros, foram instalados os incineradores das indústrias químicas Ciba, Basf, Hoescht (atual Clariant), Bayer, Cetrel, Cinal e da Kompac nos aeroportos internacionais de Guarulhos, e no do Rio de Janeiro, no Banco Central, e em várias Prefeituras, como a de Brasília, além do mais recente Centro de Tratamento de Resíduos Perigosos, instalado em Fortaleza, que teve os testes de emissão de gases aprovados segundo as normas ABNT e Cetesb. Dados levantados pela Cetesb afirmam que o Brasil gera cerca de 2,7 milhões de toneladas de resíduos perigosos, entretanto, muitos técnicos afirmam que o valor real deve ser várias vezes superior a este, considerando-se as dificuldades em se realizar levantamentos precisos da geração destes resíduos, e mais complexo ainda é o conhecimento dos resíduos estocados, considerados passivos ambientais.

Em 29 de outubro de 2002, foi publicada a Resolução CONAMA n.º 316, que, segundo Caixeta (2005), disciplina os processos de tratamento térmico de resíduos e cadáveres, estabelece procedimentos operacionais, valores limites de emissão e critérios de desempenho, controle, tratamento e disposição final de efluentes resultantes destas atividades. Essa Resolução considera tratamento térmico como todo e qualquer processo cuja operação seja realizada acima da temperatura mínima de 800° C (art. 2º, inciso III).

Os artigos 22, 23 e 24 da Resolução CONAMA n.º 316 referem-se ao tratamento dos resíduos de origem urbana, da seguinte forma:

“Art. 22. O sistema de tratamento térmico de resíduos de origem urbana, ao ser implantado, deve atender os seguintes condicionantes, sem prejuízo de outras exigências estabelecidas no procedimento de licenciamento e legislações complementares:

I - área coberta para o recebimento de resíduos;

II - sistema de coleta e tratamento adequado do chorume.

Art. 23. Os resíduos de origem urbana, recebidos pelo sistema de tratamento térmico, deverão ter registro das informações relativas à área de origem e quantidade.

Parágrafo único. As câmaras deverão operar à temperatura mínima de oitocentos graus Celsius, e o tempo de residência do resíduo em seu interior não poderá ser inferior a um segundo.

Art. 24. A implantação do sistema de tratamento térmico de resíduos de origem urbana deve ser precedida da implementação de um programa de segregação de resíduos, em ação integrada com os responsáveis pelo sistema de coleta e de tratamento térmico, para fins de reciclagem ou reaproveitamento, de acordo com os planos municipais de gerenciamento de resíduos.”

Por ser uma atividade com alto risco de impacto ambiental, foi estabelecido na Resolução n.º 316/02 a exigência de estudos, tanto para uma análise de alternativas tecnológicas, de acordo com o conceito de melhor técnica disponível (art.4), quanto para o processo de licenciamento das unidades de tratamento térmico de resíduos, como Estudo de Impacto Ambiental e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), análise de Risco, dentre outros (art. 26).

Dois instrumentos legais de destaque que abordam diretamente a questão da incineração no Brasil são também a Resolução CONAMA n.º 264, de 26 de agosto de 1999, que trata do licenciamento de fornos rotativos na produção de clínquer para atividade de coprocessamento de resíduos na fabricação de cimento; e a Resolução CONAMA n.º 283, de 12 de julho de 2001, que aborda o tratamento e a destinação final dos resíduos dos serviços de saúde. Muito embora os resíduos hospitalares tenham como principal destino a incineração, esta Resolução apresenta outras técnicas de tratamento que não sejam realizadas por meio da incineração.

No coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer, não são permitidos resíduos domiciliares brutos, de serviços de saúde, radioativos, explosivos, organoclorados (por seu caráter cancerígeno), agrotóxicos e afins. As cinzas geradas no processo são misturadas ao cimento. O coprocessamento de resíduos perigosos em fornos de clínquer, embora seja também um processo de incineração, recebe um tratamento diferenciado, pois os resíduos entram em substituição ao combustível ou de parte da matéria-prima. É necessário que antes de serem incinerados, os resíduos recebam um pré-tratamento para não interferir negativamente na qualidade do cimento produzido e nem desencadear danos ao meio ambiente, o que requer rigoroso controle das emissões atmosféricas (MENEZES et al., 2000).

Além dessas Resoluções, vale ressaltar a Resolução CONAMA n.º 05/89 que

estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar, instituiu o Programa Nacional de Qualidade do Ar – PRONAR e especificou as diretrizes para a rede de monitoramento e inventário das fontes emissoras e poluentes atmosféricos. Ainda com relação à qualidade do ar, a Resolução CONAMA n.º 03/90 definiu os padrões primários e secundários para SO₂ (dióxido de enxofre), CO (monóxido de carbono), O₃ (ozônio), NO₂ (dióxido de nitrogênio), partículas em suspensão, partículas inaláveis e fumaça.

2.1.3.1. A USINAVERDE

A USINAVERDE está destacada nesta revisão por ser dela que se obteve a cinza para este estudo. A empresa foi criada no Brasil em 2001, com o intuito de oferecer uma alternativa para o destino do lixo, aliviando os aterros sanitários. É pioneira do desenvolvimento de tecnologia e processos para implantar usinas Waste-to-Energy, com foco no licenciamento de sua tecnologia patenteada para empreendedores privados que tenham interesse em estabelecer usinas WTE para gerar energia a partir do RSU.

Em funcionamento na Ilha do Fundão desde 2004, em área pertencente à Fundação BIORIO, e com parte da tecnologia desenvolvida pela COPPE/UFRJ, o centro tecnológico da empresa conta com uma Usina Protótipo construída com recursos próprios e gerando energia para que a usina opere de forma autossuficiente. Seu objetivo é o de comprovar e aprimorar as tecnologias desenvolvidas e patenteadas pela empresa.

De acordo com dados fornecidos pela empresa, as soluções para o tratamento térmico de RSU são modulares e para que o empreendimento seja viável, o mínimo de capacidade de tratamento de uma Usina deve ser de 150 t/dia. Por isso, os módulos têm capacidade para 150 t/dia ou para 300 t/dia de lixo urbano, com geração de, respectivamente, 2,8 MW e 5,6 MW de energia elétrica líquida, ou seja, que pode ser destinada à comercialização.

Além da equipe própria, são empregadas pessoas organizadas em regime de “Cooperativa de catadores”, que atuam no processo de triagem anterior à incineração, segregando materiais recicláveis (latas de alumínio, garrafas PET, papelão e etc.) para que não sejam incinerados e possam ser vendidos, gerando renda aos catadores.

Segundo a USINAVERDE, a tecnologia da incineração, desenvolvida com equipamentos fabricados totalmente no Brasil, tem valor de investimento e custos operacionais cerca de 50% menores do que as tecnologias semelhantes disponíveis no

exterior, além de não haver inconvenientes cambiais em virtude da conversão de moedas. Outro fator que reduz o custo é o preço da mão de obra, mais barata no Brasil quando comparada a de países de 1º mundo e sem necessidade de especialização devido à simplicidade do processo.

De acordo com a descrição fornecida por Fontes (2008), o processo de incineração (Figura 2.5) consiste em fazer com que o RSU, após a pesagem, passe por uma triagem, onde os materiais recicláveis são segregados manualmente e com detectores de metais localizados nas duas esteiras, por onde são conduzidos. Após a segunda esteira, o RSU é triturado e o material fino separado por uma peneira rotativa e encaminhado à secagem, para redução da umidade. Em seguida, o RSU triturado passa por nova moagem, em moinho de facas, e é depositado em um silo Combustível Derivado do Resíduo (CDR). Estes resíduos, compostos principalmente de matéria orgânica e resíduos combustíveis não recicláveis, são levados para o forno de incineração, que opera a uma temperatura de 950 °C. Durante o processo de combustão são produzidas duas cinzas: cinza de fundo e cinza volante.

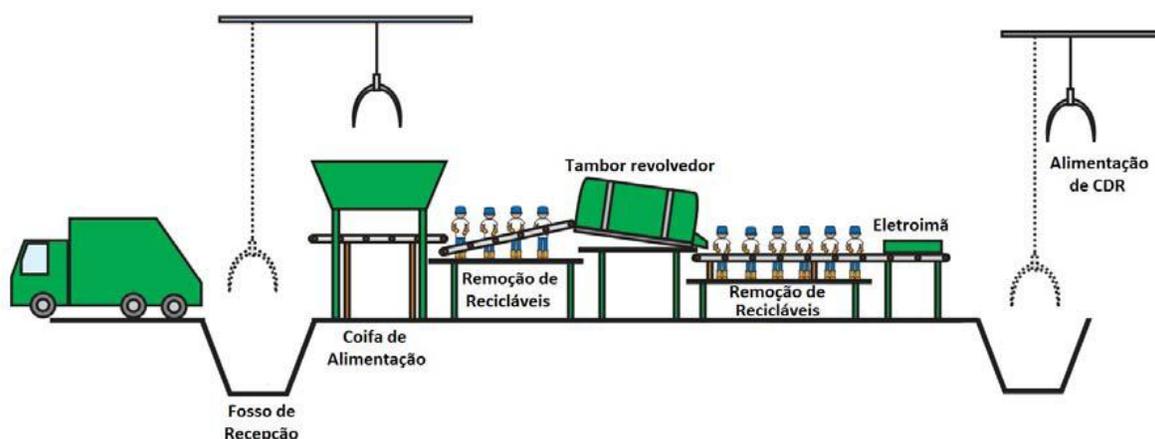


Figura 2.5 – Representação da etapa de pré-processamento de RSU na USINAVERDE (SANTOS, 2011)

Fontes (2008) descreve o processo: “A cinza de fundo (bottom-ash) é depositada no fundo da câmara de pós-combustão, encaminhada ao tanque de decantação e disposta em caçambas. Os gases quentes e a cinza volante (fly-ash) são exauridos da câmara de pós-combustão e aspirados para a caldeira de recuperação onde ocorre o aproveitamento

energético (co-geração de energia). Há uma geração efetiva de 0,6MW de energia elétrica por tonelada de lixo tratado, o que é suficiente para abastecer cerca de 2300 residências com consumo médio de 200 kW/mês. Posteriormente, os gases são neutralizados em um conjunto de lavadores e, em seguida, os gases limpos são aspirados e descarregados na atmosfera. A solução de lavagem é então recolhida nos tanques de decantação onde ocorre a neutralização com as cinzas do próprio processo e hidróxido de cálcio, o que ocasiona a mineralização (decantação dos sais), sendo esta solução posteriormente reaproveitada no processo de lavagem (recirculação). A cinza volante encaminhada para os tanques de decantação é retirada periodicamente e armazenada em caçambas. Ao final do processo de incineração são obtidos de 8 a 10%, em volume, das duas cinzas, que se dividem em cerca de 80% de cinza pesada e 20% de cinza volante (dados fornecidos pela USINAVERDE S/A)”.

De acordo com a empresa, o processo de tratamento está de pleno acordo com o que a Convenção de Estocolmo prega sobre Poluentes Orgânicos Persistentes (os chamados POPs, compostos resistentes à degradação química, fotolítica e biológica que se acumulam em organismos vivos), assinada em 2001 por 151 países, pois afirma que:

- No processo USINAVERDE a oxidação térmica dos gases é completa, ocorrendo a uma temperatura de cerca de 1050° C e com excesso de ar na queima de 110%, o que se reflete na eliminação total do monóxido de carbono. Os resultados dos testes indicam, no máximo, 2 ppm de CO nos gases emitidos na chaminé. O método de limpeza dos gases por absorção em solução de lavagem com pH alcalino mostra-se bastante eficaz.
- O processo USINAVERDE utiliza sistemas fechados de gases de combustão (pressão negativa) e de lavagem com água alcalinizada em circuito fechado.
- No processo USINAVERDE os resíduos são tratados a uma temperatura mínima de 850°C, e os gases, na câmara de pós-combustão, são submetidos a uma temperatura de 1050°C com tempo de residência mínimo de 2 segundos. As temperaturas são controladas automaticamente.

A técnica desta usina também está de acordo com o “Sumário para Formuladores de Políticas”, formulado em 2007 e elaborado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC/ONU), que recomenda especificamente a incineração de resíduos com

geração de energia como rota preferencial para a destinação final dos resíduos urbanos, pois impede a formação do biogás de aterro responsável por 3% do total de emissões dos gases do efeito estufa.

2.2. Estabilização de solos

A estabilização de um solo consiste em dotá-lo de condições de resistir a deformações e ruptura durante o período em que estiver exercendo funções que exigem essas características, num pavimento ou outra obra qualquer. De acordo com Neves et al. (2009), neste processo o solo melhora suas características, adquirindo assim as propriedades necessárias ao fim a que se destina. A necessidade de fazê-la se dá quando o solo componente de uma das camadas da pavimentação (revestimento, base, sub-base e/ou subleito) não apresentar as propriedades adequadas para suportar o carregamento imposto ao pavimento pelo tráfego.

Vargas (1977) define a estabilização de solos como o processo pelo qual se confere ao solo maior resistência às cargas, ao desgaste ou erosão, através de processo de compactação, correção de granulometria e plasticidade ou de adição de substâncias que vão lhe conferir uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos.

A utilização correta das técnicas de estabilização de solos leva à redução nos tempos de execução da obra, viabiliza a industrialização do processo construtivo além de proporcionar uma considerável economia para o empreendimento em questão (PESSOA, 2004).

A estabilização de solos compreende todas as formas de melhoria de suas propriedades, sejam elas naturais ou artificiais cujo objetivo é garantir a constância destas características durante o tempo de vida útil das obras de engenharia (SILVA, 2007).

Um solo estabilizado é aquele que passou por aplicações de processos e técnicas cujo objetivo foi a melhoria de suas propriedades mecânicas como aumento da resistência ao cisalhamento, rigidez, durabilidade, deformabilidade e permeabilidade (INGLES e METCALF, 1972 apud VENDRUSCOLO, 2003).

Vários autores fazem uma distinção entre solo estabilizado e solo melhorado de acordo com o nível de alteração feita nas propriedades do material, a quantidade de material adicionado e o tipo de material usado.

Assim, é usual a terminologia para designar duas “intensidades” de estabilização (SPECHT, 2000):

- Solo estabilizado - Quando se tem um ganho significativo de resistência com o emprego do aditivo. O termo estabilização é utilizado quando nas misturas entre solo e cal ou solo e cimento, com grandes concentrações destes aditivos, ocorrem características de durabilidade e resistência suficientes que permitam seu emprego como base de pavimento rodoviário;
- Solo melhorado - quando a adição busca melhoria de outras propriedades (por exemplo, redução da plasticidade e da expansão e contração) sem um ganho significativo de resistência. O melhoramento é atribuído a misturas que apresentam relativa alteração em suas propriedades mecânicas, com baixo teor de aditivo utilizado.

De acordo com Medina e Motta (2004), as propriedades do solo que a estabilização visa modificar são:

- Resistência ao cisalhamento, tornando-a menos sensível às mudanças ambientais, como umidade, além de torná-la compatível com as cargas que serão aplicadas à estrutura;
- Redução da compressibilidade;
- Aumento ou redução da permeabilidade.

Os métodos de estabilização de solos podem ser definidos como mecânicos, físicos e químicos. Eles podem ser ajustados e/ou combinados de acordo com a necessidade do projeto e o tipo do solo.

2.2.1. Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica é o processo que consiste em densificar o solo, compactando-o através de equipamentos mecânicos, aplicação de pressão, impacto ou vibração, em campo ou em laboratório. No campo, geralmente, usa-se um rolo compactador para obras de maior significância, onde se deseja melhor controle tecnológico, já em pequenas obras usam-se outros equipamentos de menor porte, como sapo mecânico e outros

instrumentos improvisados no local como soquetes de mão (VARGAS, 1977).

Este tratamento dado ao solo tem o objetivo de melhorar as suas características através de uma melhor “arrumação” das suas partículas constituintes, com ou sem correções da sua composição granulométrica (VENDRUSCOLO, 2003)..

Para que se obtenha a maior massa específica aparente possível, deve-se conseguir a maior relação de quantidade de partículas do solo analisado por volume, conseqüentemente atingindo o máximo de resistência. Assim a energia de compactação é definida como aquela que ocasionará a maior massa específica aparente, de forma que as partículas de solo ocupem o mínimo de espaço possível, conseqüentemente ocasionando o menor índice de vazios.

Em suma, a estabilização mecânica consiste em aplicar uma carga ao solo, compactando-o, diminuindo seus vazios, aumentando as tensões internas, conseqüentemente aumentando sua estabilidade e resistência mecânica.

2.2.2. Estabilização física

Na estabilização física as propriedades do solo são alteradas modificando-se em geral sua textura e granulometria. Este método consiste basicamente na mistura de dois ou mais materiais, de modo que a mistura se enquadre dentro de uma determinada especificação granulométrica, ou a adição de fibras. Desta combinação de materiais, surge um terceiro produto que agrega as propriedades de suas fases constituintes denominado de material compósito (SALES, 2006, apud PINTO, 2008).

A correção granulométrica consiste em construir uma nova curva granulométrica para o solo original de forma que passe a apresentar maior resistência e coesão entre as partículas, além de uma grande variedade de diâmetros de grãos. São exemplos na pavimentação: solo-brita, solo-areia, entre outras combinações.

Para estabilização física de solo também podem ser realizados processos classificados como elétricos, que se baseiam na passagem de uma corrente elétrica para estabilizar o solo. Em solos arenosos saturados o processo envolve descargas sucessivas de alta tensão e em solos argilosos são usadas descargas de baixa tensão contínuas provocando fenômenos de eletrosmose, eletroforese e consolidação eletroquímica (SILVA, 2007).

Segundo Lima (2005), a eletrosmose em um solo saturado de água caracteriza-se pelo movimento da água em relação ao solo, impulsionado por um gradiente elétrico ao qual está

submetido o sistema. Quando uma corrente direta é aplicada em um meio poroso preenchido com o líquido, há movimentação do líquido em relação à superfície sólida estacionária e carregada. Quando a superfície é negativamente carregada, o líquido flui para o cátodo. Esta movimentação contribui para a diminuição da quantidade de água no solo, consolidando-o.

O fenômeno denominado eletroforese é definido como sendo a migração de espécies carregadas eletricamente, que ocorre quando as mesmas são dissolvidas ou suspensas em um eletrólito, através do qual uma corrente elétrica é aplicada (HEIGER, 1997).

Outra opção para estabilização seria o tratamento térmico, realizado por meio da utilização da energia térmica de congelamento ou termosose. A solução do congelamento é a mais utilizada e normalmente é temporária, alterando a textura do solo. A termosose é uma técnica de drenagem onde se promove a difusão de um fluido em um meio poroso pela ação de gradientes de temperatura (ALMEIDA, 2009).

Atualmente o emprego da calcinação de argila para gerar agregados para uso em locais onde não se tem agregados naturais, como na Amazônia, por exemplo, pode ser considerada uma forma de estabilização física, onde o uso de calor intenso por queima controlada também provoca intensa alteração nos minerais argílicos presentes no solo. (NASCIMENTO, 2005; CABRAL, 2005 apud VIZCARRA, 2010)

2.2.3. Estabilização química

A estabilização química dos solos refere-se ao procedimento no qual uma quantidade de material químico qualquer (aditivo) é adicionada ao solo natural, para melhorar uma ou mais de suas propriedades. Os estabilizantes utilizados podem ser betumes, cimento Portland, cal, pozolanas, e outros (SANTOS, 2012).

Santos et al (1995) afirmam que a estabilização química consiste na adição de uma determinada substância química ao solo, de modo a provocar mudanças que venham a influenciar as propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade deste, atingindo-se, então, o objetivo de estabilizá-lo.

Na estabilização química, como o nome indica, há uma reação química do aditivo com os minerais do solo (fração coloidal) ou a constituição de recheio dos poros pelo produto de reação química do aditivo com a água. No solo-cimento e solo-cal existe, inicialmente, uma reação que se caracteriza melhor como físico-química: os cátions Ca^{++} liberados pela

hidratação do cimento reagem com a superfície dos argilo-minerais e modificam o pH da solução eletrolítica. Os produtos cimentantes que se formam posteriormente (diz-se reação pozolânica) acrescem a rigidez da mistura (MEDINA, 1987).

Também de acordo com Medina (1987), quando se forma a mistura solo-estabilizador pode ocorrer que o estabilizador forme ou não uma matriz contínua com o solo. Na matriz contínua o agente estabilizador preenche todos os poros e as partículas de solo ficam nela mergulhadas como se fossem um inerte de enchimento. Neste caso as propriedades do sistema são essencialmente as da matriz e as propriedades mecânicas do estabilizador predominam. Têm-se várias reações resultantes da mistura solo-estabilizador: reações físicas - variação de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção e reações químicas - troca catiônica, precipitação, polimerização, oxidação, solução e carbonatação. Na matriz descontínua o estabilizador não preenche todos os poros e então podem ocorrer três modos de ação:

- Modificação das características das superfícies das partículas;
- Vedação inerte dos poros;
- Interconexão das partículas de solo-solda por pontos

Os dois principais agentes químicos usados em pavimentação são o cimento Portland e a cal, que serão discutidos a seguir.

2.2.3.1. Solo-Cimento

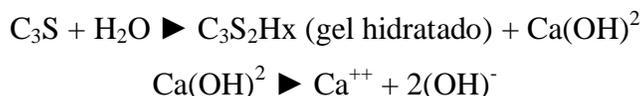
De acordo com Marques (2007), solo-cimento é o produto endurecido resultante da mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem racional, executada de acordo com as normas aplicáveis ao solo em estudo.

O processo de estabilização do solo com o cimento ocorre a partir do desenvolvimento das reações químicas que são geradas na hidratação do cimento (mistura do cimento com água). A partir daí, desenvolvem-se vínculos químicos entre as superfícies dos grãos do cimento e as partículas de solo que estão em contato com o mesmo.

Durante o processo de estabilização do solo com cimento, ocorrem dois tipos de reações: as reações de hidratação do cimento Portland e as reações entre os argilominerais e a cal liberada na hidratação do cimento (C_3S , $b-C_2S$, C_3A , $C_4AF + H_2O$).

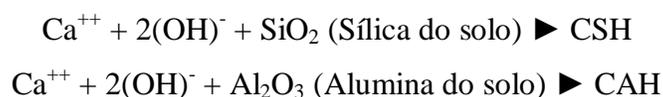
Estas reações podem ser exemplificadas da seguinte forma (MEDINA, 1987):

i) Reações de hidratação do cimento



Se o pH da mistura abaixar: $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_x \blacktriangleright \text{CSH} + \text{Cal}$

ii) Reações entre a cal gerada na hidratação e os argilominerais do solo:



As últimas reações são chamadas pozolânicas e ocorrem em velocidade mais lenta. O CSH é um composto cimentante semelhante ao $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_x$.

Nos solos granulares desenvolvem-se vínculos de coesão nos pontos de contato entre os grãos (semelhante ao concreto, porém o ligante não preenche todos os espaços).

Nos solos argilosos a ação da cal gerada sobre a sílica e alumina do solo resulta no aparecimento de fortes pontos de ligação entre as partículas de solo. Os solos granulares respondem melhor à estabilização com cimento porque nos solos argilosos a reação da cal gerada na hidratação e os argilominerais ocasionam uma queda no pH da mistura, afetando a hidratação e o endurecimento do cimento. Se o pH abaixar, o composto $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_x$ reage novamente formando CSH e cal. Como o $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_x$ é responsável pela maior parte da resistência da mistura solo-cimento, o aparecimento do CSH é indesejável quando provém deste composto, sendo benéfico apenas quando origina-se das reações da cal com os argilominerais. Portanto as reações de hidratação do cimento são as mais importantes e respondem pela maior parte da resistência final alcançada para a mistura.

Pode-se dividir a estabilização por cimento nas seguintes categorias (MEDINA, 1987):

- Solo-cimento: é um material endurecido pela cura de uma mistura íntima compactada mecanicamente com solo pulverizado, cimento portland e água, sendo esse endurecimento avaliado por critérios de durabilidade e resistência à compressão simples de corpos de prova. Normalmente é utilizado como base ou sub-base;
- Solo modificado ou melhorado: é um material não endurecido ou semiendurecido que é julgado pela alteração dos índices físicos e/ou capacidade de suporte do solo. Utiliza-se um teor baixo de cimento que não deve ser maior que 5%. Pode ser utilizado como base, sub-base ou subleito;
- Solo-cimento plástico: difere do solo-cimento definido anteriormente, por ser utilizada uma quantidade maior de água durante a mistura, de forma a produzir uma consistência de argamassa na ocasião da colocação. É utilizado para revestimento de valas, canais e taludes.

Existem dois métodos de dosagem para solo-cimento: O primeiro, estabelecido pela NBR 12253:2012 (ABNT, 2012), e o segundo, chamado método físico-químico, desenvolvido na COPPE e descrito em Casanova et al (1992).

2.2.3.2. Solo-Cal

Marques (2007) define a cal como um aglomerante resultante da calcinação de rochas calcárias (calcíticas ou dolomíticas), a uma temperatura inferior à do início de fusão do material. Dentre as várias opções de aplicação da cal pode-se citar: dar plasticidade às argamassas, construção de sub-bases e bases de pavimento e fabricação de tijolos, blocos e painéis.

Suas principais funções são:

- Melhoria permanente das características do solo;
- Aumenta a resistência à ação da água;
- Melhoria do poder de suporte;
- Melhoria da trabalhabilidade de solos argilosos;
- Diminuição da expansão de solo;
- Alteração granulométrica do solo.

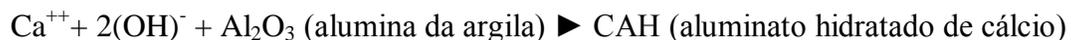
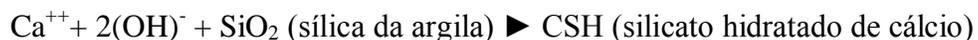
De acordo com Soliz (2007), as reações entre o solo e a cal podem ser:

- Rápida ou imediata: floculação e troca catiônica;
- Reações lentas: reação pozolânica, carbonatação e formação de novos compostos cristalinos.

Sandroni e Consoli (2010) apontaram que a carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono existente no ar ou em água estagnada entra em contato com a matriz solo-cal e converte a cal novamente em carbonato de cálcio. A carbonatação é indesejável uma vez que reduz a quantidade de cal disponível para produzir as reações pozolânicas (cimentícias).

Cal misturada com água resulta em cátions de cálcio livres, os quais podem substituir outros cátions dentro dos complexos de troca catiônica que ocorrem no solo. A troca catiônica é ao menos parcialmente responsável pela floculação e aglomeração de partículas de argila que ocorre em solos tratados com cal. O resultado prático da floculação-aglomeração é a mudança na textura do solo uma vez que as partículas de argila unem-se e formam partículas de dimensões maiores.

Vizcarra (2010) afirma que as reações pozolânicas são similares àquelas que ocorrem em solos tratados com cimento. É sabido que a cal e a água reagem com sílica e alumina existentes no solo para formar vários componentes cimentícios. Origens típicas de sílica e alumina em solos incluem argilominerais, quartzo, feldspato, micas e outros silicatos ou alumino-silicatos similares, com estrutura cristalina ou amorfa. A adição de cal também aumenta o pH do solo, aumentando a solubilidade da sílica e da alumina presentes no solo. Se uma quantidade significativa de cal é adicionada ao solo, o pH pode alcançar 12,4, que é o pH da água saturada com cal. A seguir são apresentadas as reações que ocorrem no solo tratado com cal:



Tais reações somente ocorrem na presença de quantidades de água capazes de trazer

Ca^{++} e $(\text{OH})^-$ para a superfície das partículas de argila. Consequentemente, as reações não ocorrerão em solos secos e cessarão em um solo úmido que vier a secar.

Segundo Soliz (2007), o efeito da cal nas propriedades do solo pode ser visto sob vários aspectos:

- Distribuição granulométrica: há um aumento do tamanho dos grãos, tanto mais acentuada quanto mais fino for o solo natural. A agregação pode se desfazer em parte quando se embebe o solo-cal na água, porém muitos agregados tornam-se hidrofóbicos;
- Plasticidade: o LP cresce com o uso da cal e o LL tende a diminuir. O aumento do teor de cal acarreta valores de IP cada vez menores. O IP varia com o tempo de reação;
- Variação de volume: o tratamento de um solo expansivo com cal reduz as variações de volume do solo quando este absorve água;
- Compactação: a densidade diminui e o teor de umidade ótima aumenta quando se trata um solo com cal.
- Resistência: a resistência à compressão simples é o ensaio mais comumente utilizado. O teor de cal e o tempo de cura são fatores que influem no aumento da resistência a compressão simples num solo estabilizado com cal.

Quanto maior o teor de cal maior a troca catiônica e a formação de produtos cimentantes, mas não há ensaios padronizados no Brasil para determinar um teor ótimo de cal a ser adotado para cada solo, porém é possível fazê-lo utilizando o método de dosagem físico-químico desenvolvido por Casanova et al. (1992).

2.2.3.3. Solo-Cinza de RSU

Como existem relativamente poucas usinas de incineração de RSU no mundo, e muito especialmente no Brasil, principalmente se comparado a usinas termelétricas que utilizam carvão, ainda não há muitos estudos e bibliografias sobre a estabilização de solos com cinza de incineração de RSU. Entretanto, o comportamento relatado sobre os seus efeitos e mecanismos de estabilização é comparável aos das cinzas de carvão, desde que o RSU seja principalmente composto por matéria orgânica. O produto resultante da

incineração também apresenta características diferentes, dependendo da região. Porém, cada vez mais se vem buscando alternativas para o destino do produto da queima de RSU, além da deposição em aterros, e a mistura para estabilização de solos para pavimentação vem sendo vista com bons olhos tanto no aspecto econômico quanto no aspecto ambiental.

Ferreira et al. (2003, apud Vizcarra, 2010) relatam que a Cinza Volante de RSU pode ser aplicável a rodovias como material substituto de areia e/ou cimento para bases e sub-bases estabilizadas com cimento. Questões ambientais relativas a esta aplicação são a contaminação de solo subjacente e águas subterrâneas por substâncias lixiviadas da camada de base.

Apesar das cinzas volantes terem desempenho mais satisfatório em misturas para base de pavimentos, as cinzas de fundo são mais utilizadas, pois no processo de incineração geram-se mais cinzas de fundo do que cinzas volantes. Nos Estados Unidos seu uso está limitado a alguns trechos de teste, entretanto na Europa, é utilizada como material para base de rodovias ou aterros há duas décadas. Na Dinamarca, Alemanha e Holanda mais do que 50% das cinzas de fundo de RSU produzidas é utilizado como base para rodovias e aterros (FHWA, 2008 apud Vizcarra, 2010).

Lapa (2007) afirma que a utilização das cinzas de fundo das centrais de incineração de RSU, como materiais para a construção civil, tem-se centrado, sobretudo na construção de estradas ou de infraestruturas relacionadas com os transportes rodoviários. Na Europa, o uso de cinza de fundo, nesta área de construção civil, tem abrangido um conjunto relativamente grande de aplicações, destacando-se:

- Agregados reciclados na construção de estradas;
- Materiais granulares, utilizados como sub-base dos pavimentos de locais de estacionamento;
- Construção de ciclovias;
- Estradas não asfaltadas.

A experiência portuguesa é relatada também em Reis-Barros e Lopes (2006) que estudaram a aplicação de cinzas de fundo de RSU no lugar de agregados minerais na construção de pavimentos. Determinaram as propriedades físicas e mecânicas das cinzas de fundo produzidas na Valorsul S.A, como forma de avaliar a possibilidade da reutilização

destas cinzas de fundo na construção de pavimentos rodoviários.

Uma das principais conclusões provenientes da avaliação de propriedades mecânicas foi a de que as cinzas de fundo apresentam razoável resistência das partículas, quando medida pelo ensaio de desgaste de Los Angeles, conforme visto na Tabela 2.4, variando entre 40 e 60%.

Os valores de C.B.R. (*California Bearing Ratio*) das cinzas de fundo podem variar entre cerca de 40 e 160%. Os resultados dos ensaios de CBR são semelhantes aos dos agregados britados bem graduados, o que por este ensaio pode-se concluir que seria uma excelente capacidade de suporte.

Os resultados apresentados na Tabela 2.4 e na Tabela 2.6 são de cinzas de fundo provenientes dos trabalhos de Nicolau et al. (2001) [7], Núcleo de Pavimentos Rodoviários do LNEC (2001) [8] e Chesner Engineering (2000) [9] que caracterizaram as cinzas de fundo objetivando seu uso em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Estes dados estão apresentados em Reis-Barros e Lopes (2006).

Os principais constituintes das cinzas de fundo são a sílica, o alumínio, o ferro, o sódio e o potássio, conforme indicado na Tabela 2.5, variando o seu teor com o tipo de RSU de que resultam.

Tabela 2.4 – Propriedades mecânicas das cinzas de fundo de RSU (REIS-BARROS E LOPES, 2006)

| Ensaio | | Fonte | | |
|-------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| | | [7] | [8] | [9] |
| Granulometria (%) | < 4,75 mm | - | 55,0-64,9 | 42-67 |
| | < 2,00 mm | 31,0-43,5 | 37,0-49,1 | - |
| | < 0,075 mm | 4,7-12,9 | 1,3-4,9 | 2-16 |
| Los Angeles (%) | | 45-60 | 38-44 | 37,8-60,0 |
| CBR (%) | | 40-49 | 55,3-133,4 | 74-155 |

Tabela 2.5 – Principais constituintes das cinzas de fundo de RSU de Portugal. (REIS-BARROS E LOPES, 2006)

| Constituinte | Valor (%) |
|--------------------------------|-----------|
| SiO ₂ | 16,8-27,4 |
| CaO | 5,12-10,3 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,11-11,5 |
| MgO | 0,19-1,18 |
| K ₂ O | 0,72-1,16 |
| Al ₂ O ₃ | 3,44-6,48 |
| Na ₂ O | 2,02-4,80 |

Embora os lixiviados das cinzas de fundo contêm substâncias nocivas conforme resultados apresentados na Tabela 2.6, as quantidades determinadas não são suficientemente elevadas para inviabilizarem a sua aplicação em estradas. Após maturação, as propriedades das cinzas de fundo são tais que este material obtém a classificação de resíduo não perigoso, segundo o Catálogo Europeu de Resíduos.

Tabela 2.6 – Composição química dos lixiviados das cinzas de fundo de RSU de Portugal. (REIS-BARROS E LOPES, 2006)

| Parâmetro | [7] | [8] | [9] |
|---------------------------------------|------------|-----------|---------|
| Hg (mg/kg) | l.d.* | <0,03 | 0,0002 |
| Pb (mg/kg) | 2,5-4,2 | <1,38 | 0,1-11 |
| Cd (mg/kg) | l.d.* | <0,12 | 0,025-1 |
| As (mg/kg) | l.d.* | <0,03 | 0,2-0,3 |
| Cr ⁶⁺ (mg/kg) | l.d.* | 0,26-1,46 | 0,1-0,2 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/kg) | l.d.*-8500 | 1832-4032 | - |
| C.O.T. (mg/kg) | 170-390 | 512-1524 | - |

l.d.*-abaixo do limite de detecção

Como exemplo da experiência brasileira, pode-se citar o trabalho de Vizcarra (2010) que pesquisou a possibilidade de usar as cinzas geradas pela incineração de RSU na USINAVERDE - volante e de fundo - como aditivo em uma amostra de solo não-laterítico caracterizado como uma argila inorgânica de alta plasticidade (que não é recomendável em base de pavimentos) para aplicação em bases de pavimentos rodoviários. Avaliou o comportamento físico, químico e mecânico de alguns teores de mistura solo-cinza de fundo e solo-cinza volante, estabelecendo padrões de comportamento que permitiram observar a influência da adição de cinzas, relacionando-as com os parâmetros de deformabilidade do

solo.

Dos ensaios de módulo de resiliência realizados por Vizcarra (2010) foi concluído que o teor de cinza tem influência no comportamento resiliente, sendo que este pode melhorar ou piorar, dependendo do teor de cinzas. Outros fatores que influenciam o comportamento resiliente foram o teor de umidade, o tempo decorrido entre a compactação e a mistura dos materiais e o tempo de cura pós-compactação, o qual tem influência favorável para misturas de solo-cinza volante. O comportamento resiliente do solo é dependente principalmente da tensão desviadora, sendo que esta dependência não muda com a adição das cinzas.

No referido estudo, o solo estudado apresentou capacidade de suporte (CBR) de 2% na umidade ótima e uma expansibilidade de 4,87%. Estes resultados indicam que este material não pode ser usado em pavimentos. A adição de cinzas aumentou o CBR, o que indica uma melhoria na sua capacidade de suporte, reduzindo a expansibilidade do solo estudado, sendo que a cinza volante tem maior ação estabilizante, ressaltando-se a dependência do teor de cinza utilizado. A mistura do solo com cinza volante a um teor de 40% conseguiu reduzir a expansibilidade do solo para menos de 0,5%, viabilizando assim seu emprego em base de pavimentos.

Por fim, Vizcarra (2010) conclui que o emprego do solo misturado com um teor de cinza volante de 40% seria viável para fins de pavimentação. O dimensionamento exploratório feito para baixo volume de tráfego assinala uma espessura de base de 15 cm para vida útil de projeto de 8 anos, isto significa que para uma rodovia de 10 m de largura e 1 km de comprimento, o volume necessário de cinza volante é de 600 m^3 , para emprego na base do pavimento.

Outro exemplo da experiência brasileira é o artigo escrito por Ubaldo et al. (2012), que analisa a adição de cinzas volantes provenientes da USINAVERDE para estabilização química de um solo residual com baixa capacidade de suporte. Foi relatado que, por apresentar teores médios de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , elevado teor de CaO e baixo teor de matéria orgânica, a cinza influencia favoravelmente o mecanismo de estabilização química. Foi avaliada a influência na resistência mecânica de misturas solo-cinza volante de RSU sobre dois aspectos: i) variando o tempo de cura da mistura após a compactação e ii) variando o intervalo de tempo entre a homogeneização da mistura e sua compactação.

De acordo com Ubaldo et al. (2012), a qualidade na estabilização de misturas solo/cinza volante depende muito das características da cinza volante e do tipo de solo usados.

A avaliação da influência do tempo de cura do corpo de prova moldado com solo/cinza volante de RSU mostra que a cinza utilizada funciona perfeitamente como agente químico para estabilização de solo, aumentando a resistência mecânica da mistura realizada tanto com solo argiloso quanto com solo arenoso.

Para a parte do estudo que visava avaliar a influência do intervalo de tempo entre a homogeneização e a compactação da mistura, os resultados dos ensaios não foram conclusivos, mas pode-se afirmar que não houve perda significativa na resistência da mistura solo-cinza volante compactada após 3 dias de homogeneização.

3. Programa Experimental

Neste trabalho, os ensaios de laboratório para determinação das características físicas, químicas e mecânicas foram realizados nas dependências do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação Prof^o Jacques de Medina, localizado na UFRJ - Ilha do Fundão. Foram utilizados três materiais: solo granular, cinza de fundo de RSU e cal calcítica CH-I. A análise foi feita através da comparação de resultados entre alguns teores de misturas envolvendo o solo, a cinza de fundo de RSU e cal, com a finalidade de compor camadas de base ou sub-base de um pavimento, tendo a cinza de fundo e a cal sido adicionados com a intenção de melhorar as propriedades do solo, para que o resultado da composição seja um material adequado para fins de pavimentação.

3.1. Materiais utilizados

3.1.1. Solo

Foram usadas amostras de solo coletadas no município de Belford Roxo, na ocasião tendo sido coletados 8 m³ de solo em terreno localizado na Av. Automóvel Clube N^o 588 - Parque São José. Este solo foi utilizado no trabalho de Miranda (2013), no qual, através da realização de ensaio MCT, constatou-se que o solo tem comportamento Não-Laterítico e Silto-Arenoso (NS'). Segundo Nogami e Vilibor (1995), esta categoria compreende solos resultantes de intemperismo tropical em rochas eruptivas e metamórficas. Caracterizam-se principalmente por terem, quando compactados na umidade ótima e massa específica aparente máxima da energia normal, baixa capacidade de suporte quando imersos em água, baixo módulo de resiliência, elevada erodibilidade e expansibilidade (porém com baixa pressão de expansão), elevado coeficiente de sorção e média permeabilidade.

Em suas condições naturais, estes solos apresentam geralmente baixa massa específica aparente seca, podem ser colapsíveis e ter baixa capacidade de suporte. Não são recomendados para uso como camada de pavimento. A Figura 3.1 mostra a textura e a cor do solo descrito.



Figura 3.1 – Amostra do solo utilizado neste trabalho

3.1.2. Cinza de fundo de RSU

As amostras de cinza de fundo da queima de RSU utilizadas são provenientes da USINAVERDE, empresa localizada na Ilha do Fundão – Rio de Janeiro – RJ. A incineração e coleta das cinzas foram realizadas no mês de Junho/2009. Foi a mesma cinza de fundo utilizada no trabalho de Vizcarra (2010), que mostrou que a cinza tem alta concentração de carbono orgânico, que pode inibir a atividade pozolânica. Nos ensaios de solubilização de Vizcarra (2010) a cinza de fundo foi classificada como Classe IIA – Resíduo Não Perigoso e Não Inerte, pois os parâmetros analisados Cloretos, Sódio, Sulfato (expresso como SO_4), Fenóis Totais apresentaram concentrações ligeiramente superiores às indicadas no Anexo G da norma NBR 10004:2004 (ABNT, 2004) como pode ser visto na Tabela 3.1.

Os Resíduos da Classe IIA – Não Perigoso e Não Inerte, de acordo com a NBR 10004/2004 podem apresentar características, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. A Figura 3.2 ilustra a cinza de fundo de RSU utilizada neste trabalho.

Tabela 3.1 – Quantidades de substâncias solubilizadas na cinza de fundo e limite previsto pela NBR 10004:2004

| Parâmetro | Quantidade solubilizada em mg/L | Limite previsto pela NBR 10004:2004 em mg/L |
|---------------|---------------------------------|---|
| Cloretos | 271 | 250 |
| Sódio | 236 | 200 |
| Sulfato | 290 | 250 |
| Fenóis totais | 0,021 | 0,01 |



Figura 3.2 – Amostra de Cinza de Fundo de RSU da USINAVERDE (VIZCARRA, 2010)

3.1.3. Cal

A cal utilizada no trabalho é uma cal calcítica do tipo CH-I, sendo uma cal de alta pureza, com resultados melhores nos ensaios de qualidade e com maior concentração de CaO, é proveniente do estado de Minas Gerais e foi cedida gentilmente para estudos pela empresa Lhoist através do engenheiro Guilherme Campos. Na Figura 3.3 pode-se ver a aparência da cal que foi utilizada nos ensaios.



Figura 3.3 – Amostra de Cal Calcítica utilizada neste trabalho

3.2. Misturas ensaiadas

O solo e as cinzas estiveram armazenados individualmente no laboratório em sacos plásticos de 25 kg. Como pode ser visto na sequência da Figura 3.4, os materiais foram misturados e logo depois foi adicionado água para atingir o teor de umidade desejado para a compactação. Então as misturas foram armazenadas e etiquetadas em sacos plásticos, para preservar a umidade e guardadas por pelo menos um dia na câmara úmida do laboratório, para promover a homogeneização da umidade em todo o material. Os produtos resultantes deste processo podem ser vistos na Figura 3.5 e na Figura 3.6.

Foram feitas três combinações: solo-cinza de fundo em duas proporções e solo-cinza de fundo-cal. As proporções foram escolhidas a partir dos resultados de Vizcarra (2010). O uso da cal teve a intenção de promover reação pozolânica e melhorar de forma mais acentuada das características da mistura solo-cinza.

Para adicionar cal à mistura utilizaram-se praticamente os mesmos procedimentos. Os materiais foram misturados a seco e em seguida adicionou-se água. Porém, quando introduzida a cal, a mistura foi compactada imediatamente para que não houvesse tempo de reação da cal com a água, ou que este tempo fosse o menor possível. Duas misturas com apenas solo-cinza de fundo de RSU foram feitas nas proporções de 80% de solo com 20% de cinza de fundo e 60% de solo com 40% de cinza de fundo e uma mistura foi feita com

solo-cinza de fundo de RSU-cal. Essa mistura foi realizada na proporção de 77% de solo, 20% de cinza de fundo de RSU e 3% de cal. Esta foi a proporção escolhida para os ensaios com cal, pois a mistura S80/CF20 foi a que apresentou melhor resultado no ensaio triaxial de módulo de resiliência. As proporções de cada mistura estão descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Descrição dos materiais ensaiados com solo e cinza de fundo

| Material/Mistura | % de Solo | % de Cinza de Fundo | % de Cal | Símbolo |
|------------------|-----------|---------------------|----------|-------------|
| Solo | 100 | 0 | 0 | S |
| Cinza de Fundo | 0 | 100 | 0 | CF |
| Mistura 1 | 80 | 20 | 0 | S80/CF20 |
| Mistura 2 | 60 | 40 | 0 | S60/CF40 |
| Mistura 3 | 77 | 20 | 3 | S77/CF20/C3 |



Figura 3.4 – Sequencia de preparação da mistura dos materiais neste trabalho



Figura 3.5 – Mistura 1 (S80/CF20) deste trabalho

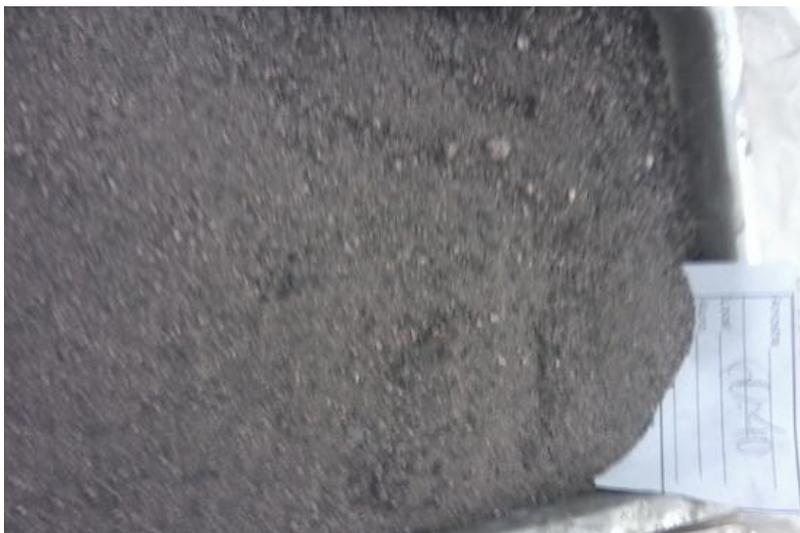


Figura 3.6 – Mistura 2 (S60/CF40) deste trabalho

3.3. Métodos e procedimentos de ensaio

Neste item estão apresentadas as metodologias, procedimentos e demais informações necessárias para a realização dos ensaios de caracterização física, química e mecânica dos materiais utilizados. Os seguintes ensaios de caracterização foram realizados:

a) Caracterização física:

- Massa Específica Real dos Grãos;
- Análise granulométrica;
- Limites de Atterberg.

b) Caracterização química:

- Dosagem físico-química.

c) Caracterização mecânica:

- Ensaio de compactação;
- Ensaio de CBR;
- Ensaio triaxial de módulo de resiliência.

Para caracterização dos materiais foram realizados ensaios para determinação de massa específica real dos grãos, Limites de Atterberg e análise granulométrica. Para obter os parâmetros de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima para cada mistura foi realizado o ensaio de compactação. Através do ensaio triaxial de cargas repetidas determinou-se o Módulo de Resiliência dos corpos de prova. O Módulo de Resiliência é um método aceito internacionalmente para caracterizar materiais para o projeto de dimensionamento de pavimentos pelo método mecanístico e para a avaliação de seu desempenho.

3.3.1. Caracterização Física

Os ensaios de caracterização física têm como objetivo determinar as propriedades índice do material. Os materiais utilizados passaram por ensaios de análise granulométrica, limites de Atterberg e massa específica real dos grãos. A determinação das propriedades físicas do material é de grande importância, visto que estão diretamente relacionadas com o comportamento mecânico que o mesmo apresentará quando submetido às cargas provenientes do tráfego.

3.3.1.1. Massa específica real dos grãos

Para a determinação da massa específica dos grãos dos materiais isolados e das misturas foi feito ensaio de acordo com os procedimentos da norma DNER-ME 093/1994 (DNER, 1994) – massa específica real dos grãos.

Para fazer o ensaio foi misturado com água destilada cerca de 25g do material destorroado e passado na peneira 0,42 mm (#40) e deixado em repouso por 24 horas. O ensaio foi descrito em Almeida (2005) na seguinte ordem:

- 1 - Pesar o picnômetro vazio, seco e limpo. Anotar o valor auferido (M_1);
- 2 - Colocar a amostra no picnômetro e pesar (M_2);
- 3 - Colocar água destilada no picnômetro até cobrir, com excesso, a amostra (Figura 3.7);
- 4 - Aquecer o picnômetro, deixando-o ferver pelo menos 15 minutos, para expulsar todo o ar existente entre as partículas do solo, efetuando sua deaeração, e agitando-o para evitar superaquecimento. Usar tela entre a chama e o picnômetro, ou banho-maria. (Figura 3.8);
- 5 - Deixar o picnômetro esfriar ao ar ambiente;
- 6 - Completar o volume do picnômetro com água destilada, repousá-lo em banho de água à temperatura ambiente por quinze minutos, colocar a rolha perfurada de modo que a água aflore à sua parte superior. Anotar a temperatura do banho (T);
- 7 - Retirar o picnômetro do banho, enxugar e secar com pano limpo e seco. Pesar o picnômetro e conteúdo (M_3);
- 8 - Retirar todo o material de dentro do picnômetro, lavar e encher completamente com água destilada. Colocá-lo no banho de água à temperatura ambiente por quinze minutos, colocar a rolha perfurada, deixando a água aflorar à sua parte superior. Verificar a temperatura do banho (T), retirar o picnômetro do banho, enxugar com pano limpo e seco e pesar, obtendo (M_4).

$$\delta_T = (M_2 - M_1) / ((M_4 - M_1) - (M_3 - M_2))$$

Onde:

δ_T = densidade real do solo à temperatura T;

M_1 = massa do picnômetro vazio e seco, em g;

M_2 = massa do picnômetro mais amostra, em g;

M_3 = massa do picnômetro mais amostra, mais água, em g;

M_4 = massa do picnômetro mais água, em g.



Figura 3.7 – Picnômetro com amostras cobertas por água destilada para ensaio de massa específica



Figura 3.8 – Aquecimento do picnômetro para expulsão do ar entre as partículas

3.3.1.2. Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi feita de acordo com a NBR 7181/1984 (ABNT, 1984). Como o solo em estudo é constituído de fração grossa e fina realizou-se esse ensaio por meio da granulometria conjunta, isto é, através de peneiramento e sedimentação. Primeiramente, no peneiramento passa-se o material nas peneiras de 3/4", 3/8", #4, #8 e #10, anotando as massas retidas acumuladas em cada peneira.

O material passante na peneira #10 é utilizado para fazer o peneiramento fino. Para a etapa correspondente à sedimentação foram realizados ensaios com defloculante hexametáfosfato de sódio ($\text{Na}_{16}\text{P}_{14}\text{O}_{43}$).

O ensaio de sedimentação foi executado com o material passante na peneira n° 10 colocado em 125 ml de defloculante (hexametáfosfato de sódio). Esse material ficou em repouso por 24 horas e então foi submetido à dispersão mecânica. Em seguida foi colocado em uma proveta de 1000 ml onde o restante do volume foi completado com água destilada e depositada em um tanque em banho-maria para então serem realizadas as devidas leituras em períodos de tempo determinados, através de um densímetro. Após as leituras o material foi colocado na peneira 0,075mm (#200) e submetido ao processo de lavagem com movimentos circulares e suaves. Posteriormente, o material foi levado à estufa para secagem e, depois que a massa ficou constante, foi passado nas peneiras #20, #30, #40, #60, #100 e #200 para o peneiramento fino, anotando as massas retidas acumulada em cada peneira.

3.3.1.3. Limites de Atterberg

De acordo com Almeida (2005), pode-se afirmar que:

“Se a umidade de um solo coesivo é muito elevada, a ponto de este solo se apresentar como um fluído denso, se diz que o solo se encontra no Estado Líquido. Neste estado o solo praticamente não apresenta resistência ao cisalhamento.

À medida que perde água, o solo (coesivo) endurece (ou fica mais viscoso). A partir de certo teor de umidade $h_1 = LL$ (Limite de Liquidez), perde sua capacidade de fluir, porém pode ser moldado facilmente e conservar sua forma. Então o solo está no Estado Plástico.

Com a continuação de perda de umidade, a capacidade de ser moldado diminui, até que a partir de um teor de umidade $h_2 = LP$ (Limite de Plasticidade), uma amostra se fratura ao se tentar moldá-la. Este é o chamado Estado semi-sólido, no qual o solo tem aparência

sólida, mas sofre reduções de volume enquanto continuar a secar.”

Visando caracterizar a interação do solo com a água, os ensaios de limite de liquidez e de limite de plasticidade foram realizados segundo as normas NBR 56 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 1984) e a NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 1984). Através dos dados obtidos por meio desses ensaios, foi determinado o Índice de plasticidade (IP, em %), obtido através da diferença entre o limite de liquidez (LL, em %) e o limite de plasticidade (LP, em %): $IP=LL-LP$.

3.3.2. Caracterização Química

3.3.2.1. Dosagem Físico-Química da Cal

O ensaio originalmente se dedica a determinar a dosagem de cimento em uma mistura de solo-cimento, como foi estudado em Casanova et al. (1992), mas em nosso caso o ensaio será adaptado para determinar a teor mínimo de cal para a satisfação físico-química da mistura solo-cinza de fundo de RSU.

O procedimento, que sofreu pequenas modificações em relação ao descrito por Casanova et al. (1992), consiste em separar 8 provetas e colocar uma mistura de 20 gramas da combinação de solo-cinza de fundo (80%-20%), passada na peneira #10, em cada proveta, variando nelas o teor de cal da mistura em 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 15%. Os materiais foram misturados e logo depois transferidos para a proveta, onde foi adicionada água destilada até 150 ml (Figura 3.9), agitando a mistura manualmente em seguida para melhor homogeneizá-la (Figura 3.10). Após essa preparação, a solução foi deixada em repouso por 24 horas, passado este tempo foi realizada a leitura do volume ocupado pela mistura decantada e novamente a mistura foi agitada com auxílio de um bastão em movimentos circulares a fim de homogeneizar e novamente deixada em repouso por mais 24 horas. Este procedimento foi repetido até serem obtidas leituras constantes ou decrescentes em cada proveta. Com as leituras, monta-se uma tabela com as percentagens de cal, e nela calcula-se a variação volumétrica percentual das misturas presentes em cada proveta ($\% \Delta V$) em relação à da proveta sem cal.



Figura 3.9 – Provetas contendo a mistura ensaiada com água destilada no ensaio físico-químico de dosagem



Figura 3.10 – Proveta sendo agitada para homogeneização no ensaio físico-químico de dosagem

Com essas leituras foi possível calcular a variação volumétrica do sedimento mistura-cal em relação à mistura pura, para os diversos teores de cal escolhendo-se para o cálculo o maior volume obtido para cada teor. Segundo Casanova et al. (1992), o ponto de variação volumétrica máxima será o correspondente ao teor mínimo de cal requerido para a satisfação físico-química do solo, contribuindo para o aumento da resistência mecânica.

3.3.3. Caracterização Mecânica

3.3.3.1. Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados para as misturas S80/CF20, S60/CF40 e S77/CF20/C3, em corpos de prova 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura em moldes de cilindro tri-partido. A energia de compactação intermediária foi aplicada em um aparelho compactador mecânico (Figura 3.11). Ao fim de testes com vários teores de umidade é possível determinar a massa específica aparente seca máxima (γ_s , em g/cm^3) e a umidade ótima (w_{ot} , em %) de cada amostra. Os moldes tripartidos cilíndricos de 10 x 20 cm foram utilizados para moldar os corpos-de-prova (Figura 3.12), que também serão utilizados em ensaios de módulo de resiliência.



Figura 3.11 – Compactador mecânico utilizado para moldar os corpos de prova



Figura 3.12 – Corpo-de-prova moldado em molde tripartido no compactador mecânico

O ensaio de compactação foi realizado após a mistura ser deixada por aproximadamente 24 horas na câmara úmida (exceto no caso da mistura com a cal, para não haver reação), adicionando água ao material em quantidades estimadas de acordo com a experiência dos operadores envolvidos até que se pudesse plotar um gráfico de umidade x massa específica seca com pelo menos dois pontos no ramo seco, dois pontos no ramo úmido e um ponto próximo à umidade ótima, conforme recomendado na norma NBR 7182/1986 (ABNT, 1986).

3.3.3.2. Ensaio de CBR

No ensaio de CBR ou Índice de Suporte Califórnia (ISC), determina-se uma relação entre a pressão aplicada por um pistão de diâmetro padrão para penetrar o solo e pressão aplicada pelo mesmo pistão necessária para penetrar a mesma profundidade em uma amostra de brita graduada de alta qualidade que foi adotada como padrão de referência. É um ensaio simples e, por isso, bastante usual para avaliar o comportamento do solo para pavimentação, embora seja questionável quanto a real avaliação das características do solo sob o ponto de vista da deformabilidade.

O ensaio é composto de três etapas:

- Compactação do corpo de prova na umidade ótima com energia intermediária;
- Imersão do cilindro com o corpo de prova no tanque pelo período de 96 horas. Durante o período de imersão do conjunto “cilindro + corpo de prova” de 96 horas são realizadas leituras de deformação a cada 24 horas. (Figura 3.13)
- Colocar o pistão da prensa no topo do corpo de prova, não se esquecendo de zerar o extensômetro em seguida, pois esta será a leitura de referência. Aplicar a pressão no pistão, penetrando na amostra a uma velocidade de 1,27 mm/min, registrando-se a carga e a penetração correspondente de 30 em 30 segundos pelo período de 6 minutos.



Figura 3.13 – Cilindro imerso com extensômetro instalada para realizar leituras de expansão- ensaio CBR

De posse dos resultados, traça-se um gráfico relacionando os valores de carga aos de penetração. Se a curva apresentar ponto de inflexão, traça-se por este uma reta seguindo o comportamento da curva, até que intercepte o eixo das abscissas. Esse ponto de interseção será a nova origem, provocando assim uma translação no sistema de eixos. Do gráfico obtêm-se, por interpolação, as cargas associadas às penetrações de 2,5 e 5,0 milímetros.

Por definição:

$$CBR (ISC) = [(Pressão encontrada)/(Pressão padrão)]x100.$$

A pressão a ser utilizada no cálculo será a carga obtida dividida pela área do pistão para as duas penetrações. O ISC será o maior dos valores.

3.3.3.3. Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio triaxial de cargas repetidas, realizado de acordo com os procedimentos recomendados pela norma DNIT 134/2010-ME (DNIT, 2010), foi feito utilizando o equipamento triaxial de carga repetida do Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ. A sequência de montagem para a realização do ensaio pode ser vista na Figura 3.14. Este ensaio tem por finalidade obter o módulo de resiliência dos materiais ensaiados, sendo este calculado pela seguinte equação:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Onde:

MR – módulo resiliente;

σ_d - tensão desviadora cíclica;

ε_r - deformação vertical resiliente

O ensaio foi realizado em corpos de prova 10 x 20 compactados com energia intermediária, assim como no ensaio de compactação. Os corpos de prova foram moldados com a umidade ótima previamente determinada para cada mistura. A compactação se dá no material que foi homogeneizado e guardado em um saco plástico hermeticamente fechado e deixado na câmara úmida por pelo menos 12 horas antes da compactação. Só após esse procedimento é que se pode levar o material para o compactador mecânico, exceção feita à mistura S77/CF20/C3 que utiliza cal CH-I, pois esta foi compactada assim que o material foi misturado e hidratado, não sendo deixada na câmara úmida para que não haja tempo de haver reação da cal com a água.

Antes da etapa do ensaio que determina os valores de MR do corpo de prova, realiza-se uma etapa de condicionamento neste, onde são aplicados 3 pares de tensões

distintos (confinante σ_3 e desvio σ_d) relacionados na Tabela 3.3, aplicando 500 repetições para cada par de tensão aplicada. Este procedimento tem por finalidade eliminar as grandes deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de tensão-desvio e reduzir o efeito da história de tensões no valor do módulo de resiliência



Figura 3.14 – Sequencia de montagem do equipamento triaxial de carga repetida

Tabela 3.3 – Níveis de tensões utilizados durante o Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas na etapa de condicionamento (Fonte: Medina e Motta, 2005)

| Etapa de Condicionamento | | |
|--------------------------|-------------------------|---|
| Tensão Confinante (MPa) | Tensão Desviadora (MPa) | Razão entre Tensão Confinante/Tensão Desviadora |
| 0,07 | 0,07 | 2 |
| 0,07 | 0,21 | 4 |
| 0,105 | 0,315 | 4 |

Após o condicionamento do corpo de prova, é iniciado o procedimento para determinar o módulo de resiliência através do ensaio triaxial dinâmico. Essa parte do ensaio consiste na aplicação de dezoito pares de tensão, registrando as deformações resilientes ocasionadas através da medição de deslocamentos verticais do corpo de prova, que é feita por instrumentos conhecidos como LVDT (*Linear Variable Differential Transducers*). Depois da execução do ensaio é gerado um relatório que traz informações tais como pares de tensões, deformações resilientes e módulo de resiliência. Os pares de tensões aplicados durante esta segunda etapa são mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Níveis de tensões utilizados durante o Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas na etapa de obtenção do MR (Fonte: Medina e Motta, 2005)

| Etapa de Obtenção do MR | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Tensão Confinante (MPa) | Tensão Desviadora (MPa) | Razão entre Tensão Confinante/Tensão Desviadora |
| 0,021 | 0,021 | 2 |
| | 0,041 | 3 |
| | 0,062 | 4 |
| 0,034 | 0,034 | 2 |
| | 0,069 | 3 |
| | 0,103 | 4 |
| 0,051 | 0,051 | 2 |
| | 0,103 | 3 |
| | 0,155 | 4 |
| 0,069 | 0,069 | 2 |
| | 0,137 | 3 |
| | 0,206 | 4 |
| 0,103 | 0,103 | 2 |
| | 0,206 | 3 |
| | 0,309 | 4 |
| 0,137 | 0,137 | 2 |
| | 0,275 | 3 |
| | 0,412 | 4 |

Como um dos objetivos principais deste trabalho se refere a demonstrar a influência da cal e do seu tempo de cura na resistência mecânica da mistura, realizaram-se ensaios de módulo de resiliência em cada corpo-de-prova para tempos de cura distintos: 34, 61 e 90 dias. O plano inicial era fazer com tempos de cura de 28, 45 e 90 dias, porém, por motivos de força maior (falha no fornecimento de energia elétrica), este planejamento teve de ser alterado. O dia 0 não entrou no programa de ensaios pelo fato de a reação da cal ser lenta,

sendo assim não haveria tempo para a cal gerar qualquer mudança na resistência da mistura. Durante o período em que os corpos de prova permaneceram em cura, para conservá-los, foram embalados em PVC, vedados em sacos plásticos e identificados através de um número de protocolo. Após este procedimento, os mesmos foram armazenados na câmara úmida, com temperatura e umidade constantes.

Para analisar o comportamento das misturas quanto à sua resiliência existem alguns modelos, como as relações apresentadas em Bernucci et al.(2008), que podem ser vistas na Figura 3.15 e Figura 3.16.

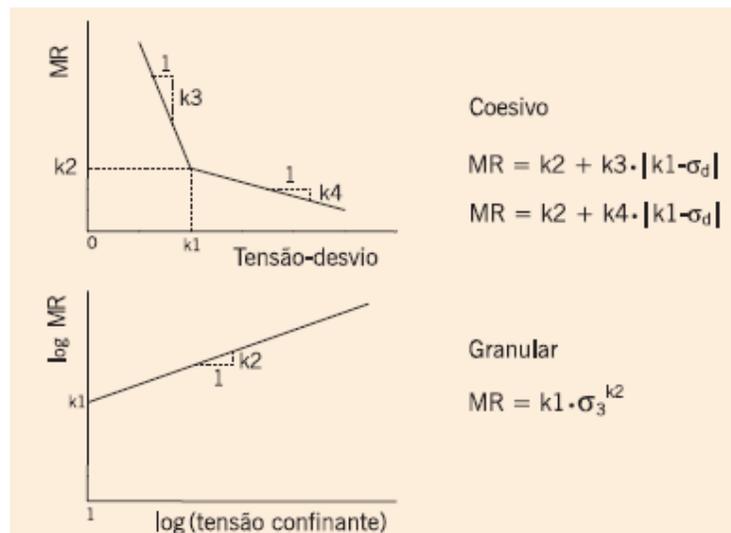


Figura 3.15 – Modelos clássicos de comportamento resiliente de solos

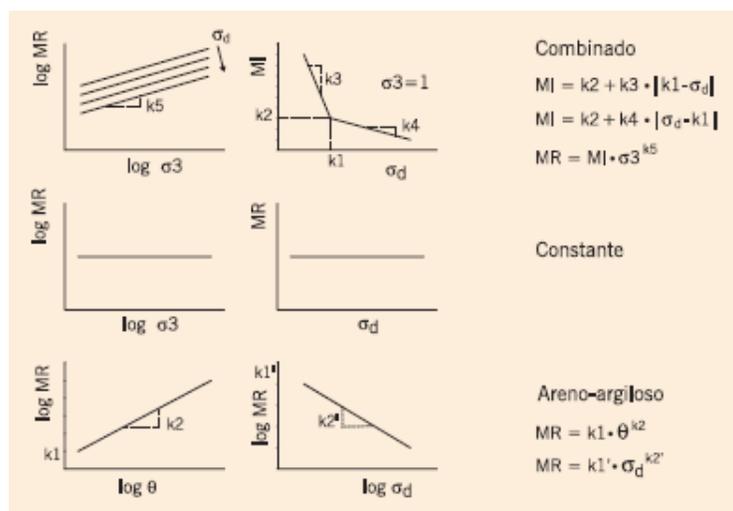


Figura 3.16 – Outros comportamentos de solos quanto à resiliência

Para os solos coesivos, a deformação resiliente axial depende consideravelmente da tensão-desvio aplicada. O módulo de resiliência varia significativamente para baixas tensões-desvio, diminuindo sensivelmente essa variação para maiores tensões-desvio (Figura 3.15). Portanto, o solo coesivo no subleito, onde as tensões advindas das cargas de rodas já estão bastante reduzidas, pode apresentar o módulo de resiliência significativamente maior que aquele observado se o material fosse empregado como base de pavimento. Embora o solo possa ser homogêneo, o módulo de resiliência aumentará com a profundidade, pois as tensões-desvio diminuem. Para os solos granulares, o módulo de resiliência aumenta com a tensão de confinamento e varia muito pouco com a tensão-desvio (Figura 3.15). Para níveis mais altos de tensão-desvio e baixas tensões de confinamento, a deformação permanente passa a ser excessiva (BERNUCCI et al., 2008).

Além dos comportamentos tipicamente granular e coesivo, há solos que dependem tanto da tensão de confinamento como da tensão-desvio (Figura 3.16), classificando-os como de comportamento combinado, ou ainda como os solos areno-argilosos. Observe-se ainda que para os materiais estabilizados com porcentagens significativas de cimento ou cal, devido à cimentação das partículas, o módulo de resiliência tende a ser constante, independente da tensão-desvio e da tensão de confinamento, como visto em modelo na Figura 3.16 (BERNUCCI et al., 2008).

3.4. Dimensionamento de pavimento típico

Para realizar uma análise mecanística-empírica da aplicação dos materiais e misturas estudadas na camada de base do pavimento, foi utilizado o programa computacional SisPav (FRANCO, 2007), que utiliza a Análise Elástica de Múltiplas Camadas para obter tensões e deformações devido aos carregamentos.

Na Figura 3.17 observa-se o fluxograma básico de dimensionamento no qual Franco (2007) se baseou para desenvolver o SisPav.

Para o presente trabalho, a estrutura de pavimento considerada foi a mesma de Vizcarra (2010), ilustrada na Figura 3.18, com os mesmos coeficientes e propriedades mecânicas, variando apenas a espessura da camada de base de acordo com os parâmetros de resiliência dos materiais.

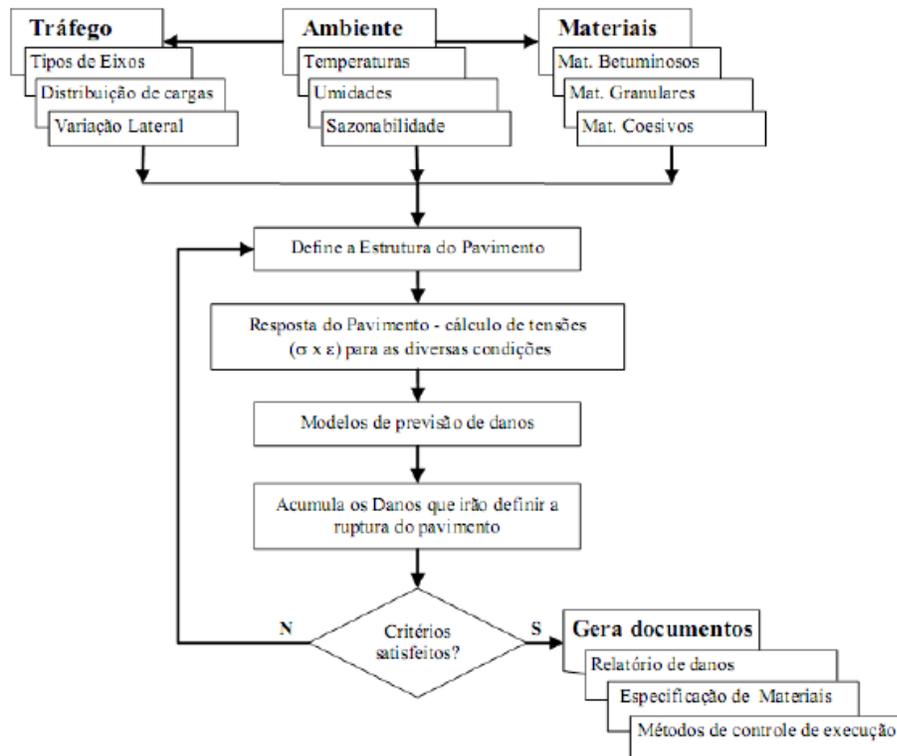


Figura 3.17 – Fluxograma de Desenvolvimento do SisPav (Fonte: FRANCO,2007)

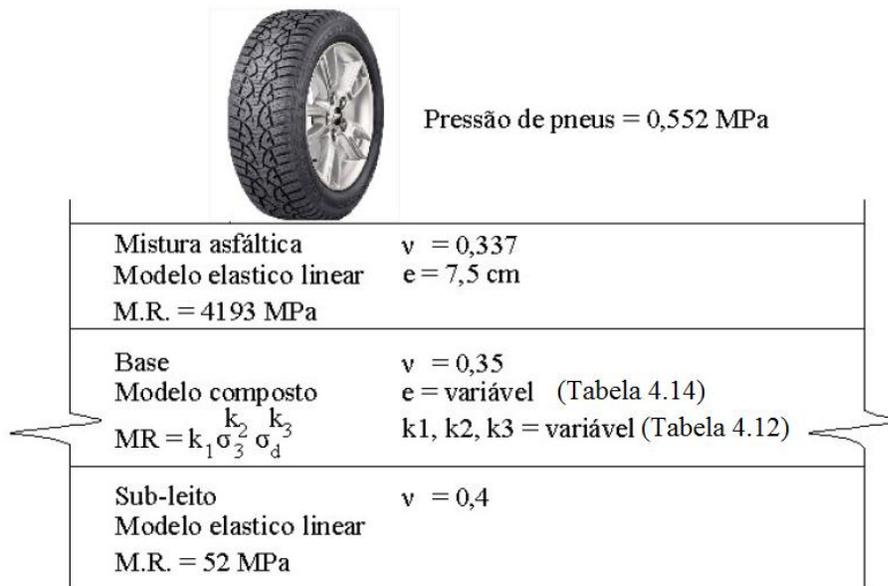


Figura 3.18 – Estrutura do Pavimento Típico adotada para análise mecanística-empírica (Fonte: VIZCARRA, 2010)

Também foram adotados os dados climáticos do mês de janeiro no Rio de Janeiro (Figura 3.19) já inseridos na base de dados do programa e dados de tráfego corresponde a rodovia de baixo volume de tráfego (Figura 3.20).

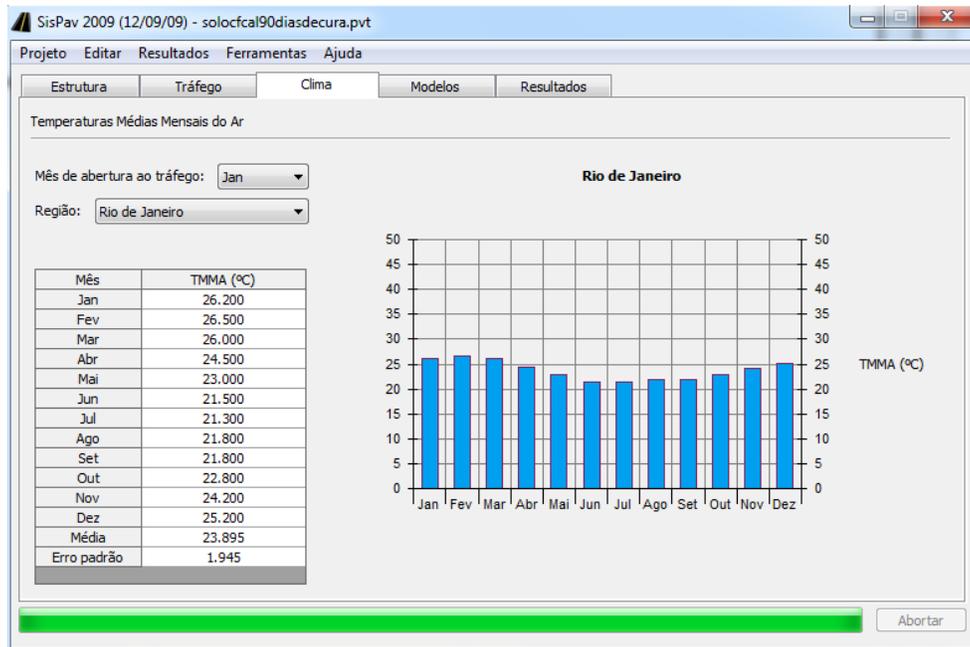


Figura 3.19 – Dados climáticos adotados no SisPav neste trabalho

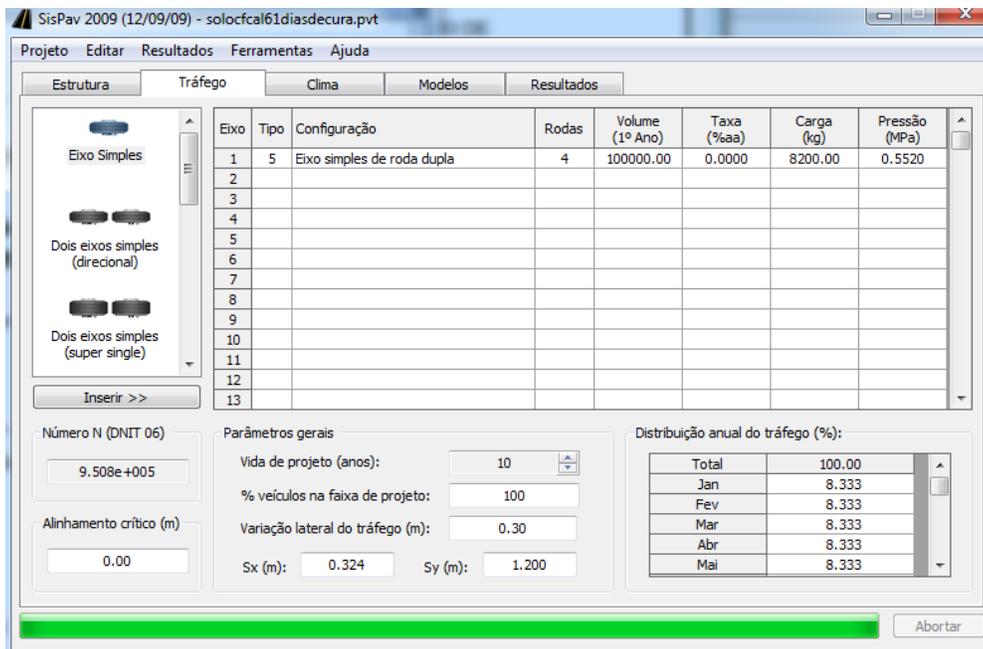


Figura 3.20 – Características do Tráfego adotado no SisPav para período de projeto de 10 anos neste trabalho

O modelo utilizado pelo programa, válido para misturas asfálticas com ligantes convencionais, obtido por Franco (2007), com base em ensaios, também realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ foi:

$$N_f = f_{cl} \cdot 1,904 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_t^{-2,821} \cdot MR^{-0,74}$$

Sendo:

N_f = vida de fadiga

f_{cl} = 10000 (fator campo-laboratório)

ϵ_t = deformação específica de tração

MR = módulo de resiliência da mistura asfáltica (MPa)

Com os resultados obtidos pelo SisPav será possível avaliar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de cada material no pavimento.

4. Apresentação dos resultados

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais realizados de acordo com os métodos descritos no capítulo 3, para as amostras catalogadas. Estes resultados são comentados para a melhor compreensão dos resultados e do comportamento das misturas estudadas. Todas as caracterizações visam avaliar o potencial das misturas estudadas para utilização como material para compor uma das camadas do pavimento.

Na Tabela 4.1 está apresentada a quantidade de ensaios realizados para avaliar as misturas solo-cinza.

Os resultados de ensaios para solo puro e cinza de fundo de RSU pura listados a seguir foram obtidos respectivamente dos trabalhos de Miranda (2013) e Vizcarra (2010) que utilizaram estes materiais em suas respectivas pesquisas.

Tabela 4.1 – Número de ensaios realizados neste trabalho

| Ensaio | S80/CF20 | S60/CF40 | S77/CF20/C3 |
|------------------------|----------|----------|-------------|
| Massa Especifica | 1 | 1 | - |
| Análise Granulométrica | 1 | 1 | - |
| Limites de Atterberg | 1 | 1 | - |
| Dosagem Físico Química | - | - | 1 |
| Compactação | 1 | 1 | 1 |
| CBR | 1 | 1 | - |
| MR | 3 | 3 | 9 |

4.1. Caracterização Física

4.1.1. Massa Específica Real dos Grãos

Os resultados obtidos pelo ensaio de picnômetro para massa específica real dos grãos encontram-se listados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultado do ensaio de massa específica real dos grãos para solo, cinza de fundo e misturas

| Amostra | Massa específica real dos grãos (Gs) |
|----------------|--------------------------------------|
| Solo (S) | 2,664 |
| S80/CF20 | 2,631 |
| S60/CF40 | 2,613 |
| Cinza de Fundo | 2,434 |

De acordo com os resultados observados na Tabela 4.2 pode-se concluir que a massa específica (Gs) diminui com o aumento do volume de cinzas de fundo na mistura, devido a menor massa específica desse tipo de cinza.

4.1.2. Limites de Atterberg

Na Tabela 4.3 serão apresentados os Limites de Atterberg (Liquidez e Plasticidade) e o Índice de Plasticidade do solo e das misturas com cinza de fundo de RSU.

No ensaio de LL, munido dos pares de valores número de golpes x teor de umidade determinados no ensaio de limite de liquidez, constrói-se um gráfico relacionando teores de umidade, em escala aritmética (nas ordenadas) com o número de golpes em escala logarítmica (nas abscissas). O teor de umidade correspondente a 25 golpes, obtido por interpolação linear é o LL. Já no ensaio de LP, o limite será a média dos valores de umidade encontrados.

Tabela 4.3 – Valores dos limites de Atterberg para cada amostra ensaiada

| Material ou mistura | LL | LP | IP (%) |
|----------------------|------|------|--------|
| Solo (S) | 46 | 21,7 | 24,3 |
| Mistura 1 (S80/CF20) | 53,7 | 22,4 | 31,3 |
| Mistura 2 (S60/CF40) | 50,5 | 23,9 | 26,6 |
| Cinza de Fundo | - | NP | - |

Os Limites de Atterberg para a cinza de fundo pura constataram material não líquido e não plástico, devido ao comportamento granular do material, que durante o ensaio não apresentou características plásticas para a sua realização.

Na mistura com 20% de cinza de fundo, o LL aumenta de 46% para 53,7%, porém, com 40% de cinza de fundo o LL diminui de 53,7% para 50,5%. Essa imprevisibilidade quanto às características plásticas das misturas com adição de cinza de fundo pode ser devido ao fato de que a cinza de fundo não é um material natural e por vezes não se comporta como o esperado.

4.1.3. Análise Granulométrica

Na Figura 4.1 estão apresentadas as curvas granulométricas do solo, da cinza de fundo de RSU e das misturas do solo com 20% e 40% de cinza de fundo (S80/CF20 e S60/CF40, respectivamente).

Como pode ser observado na referida figura, as curvas granulométricas das misturas com a cinza de fundo ficaram com granulometria mais graúda do que a do solo puro individualmente. Isso se justifica com a entrada da cinza de fundo de RSU nas misturas do estudo, pois esta tem menor presença de finos em sua composição. Na Tabela 4.4 são apresentados os percentuais de frações granulométricas em cada material analisado no ensaio de granulometria.

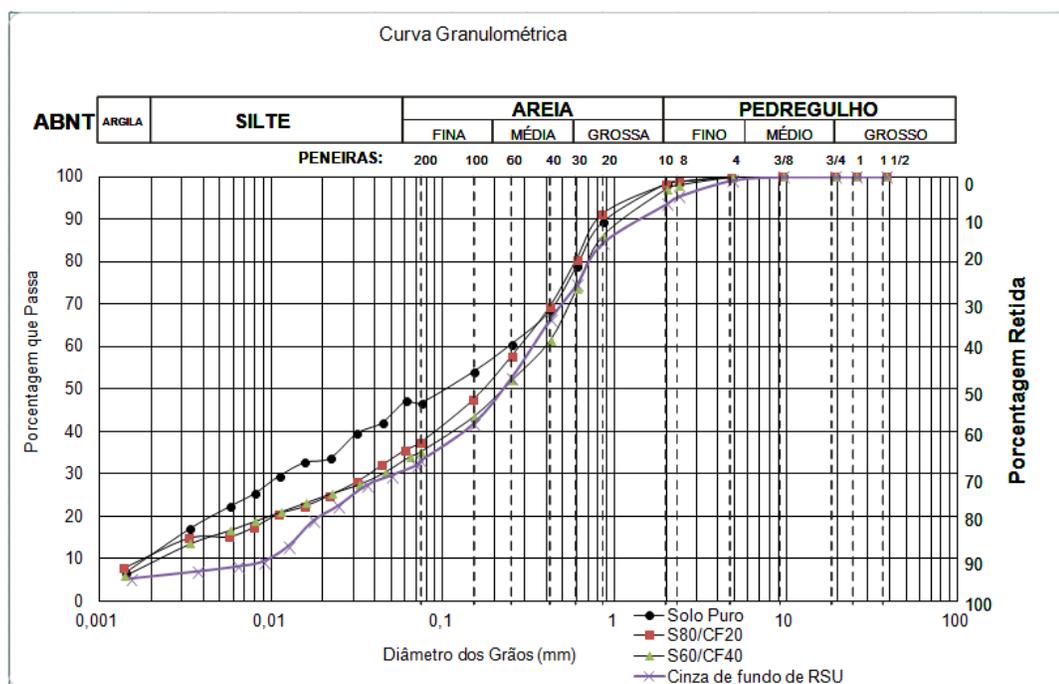


Figura 4.1 – Curvas granulométricas do solo e das misturas analisadas neste trabalho

Tabela 4.4 – Resultado das análises granulométricas do solo, cinza de fundo e misturas

| Amostra | Argila (%) | Silte (%) | Areia | | | Pedregulho (%) |
|----------------|------------|-----------|----------|-----------|------------|----------------|
| | | | Fina (%) | Média (%) | Grossa (%) | |
| Solo | 11 | 36 | 9 | 23 | 19 | 2 |
| S80/CF20 | 11 | 24 | 18 | 27 | 18 | 2 |
| S60/CF40 | 9 | 24 | 15 | 25 | 24 | 3 |
| Cinza de Fundo | 6 | 25 | 17 | 27 | 19 | 6 |

Para efeito de comparação, na Figura 4.2 encontram-se as granulometrias das misturas e do solo puro, sendo possível observar que as granulometrias das misturas se aproximam mais da faixa F das faixas granulométricas padronizadas pela norma DNIT 141/2010 (DNIT, 2010) para base estabilizada granulometricamente.

A norma DNIT 141/2010 define a sistemática a ser empregada na execução da camada de base do pavimento utilizando solo estabilizado granulometricamente e também apresenta os requisitos concernentes a materiais, equipamentos, execução, inclusive plano de amostragem e de ensaios, condicionantes ambientais, controle de qualidade, condições de conformidade e não-conformidade e os critérios de medição dos serviços.

A faixa F é referente ao material mais fino dentre os possíveis de serem usados em base, que é indicado para baixo volume de tráfego, correspondente ao número N de tráfego menor que 5×10^6 , onde N corresponde ao número de repetições do eixo padrão no período de projeto. A adição de cinzas ao solo fez com que a mistura se enquadrasse dentro dos limites da faixa F de forma mais pronunciada do que o solo puro, o que representa uma melhoria proveniente da adição de cinzas.

No entanto, não é só o requisito granulométrico que deve ser atendido para um agregado ser apto para uso em base de pavimentos. De acordo com a norma DNIT 141/2010, há outros requisitos, como o CBR, que deve ser maior que 60% para $N < 5 \times 10^6$ e maior que 80% para $N > 5 \times 10^6$; a expansão, que deve ser menor 0,5%; e a abrasão Los Angeles, que não deve apresentar desgaste superior a 55% para o agregado retido na peneira #10, admitindo-se valores maiores, no caso de, em utilização anterior, apresentarem desempenho satisfatório.

Cabe ressaltar que esta norma é referente ao uso de materiais para camada de base, mas nada impede que as misturas aqui testadas possam ser utilizadas em outras camadas mais inferiores do pavimento. Por exemplo, de acordo com a norma DNIT 139/2010 (DNIT, 2010), no caso de sub-base estabilizada granulometricamente, não há exigência de faixa granulométrica, a expansão pode ser até 1% e o CBR pode ser de 20%.

Também é importante considerar que este o solo puro ensaiado neste trabalho poderia estar na camada final de terraplenagem e teria que ser substituído ou estabilizado já que apresenta expansão elevada, acima do aceitável para subleito. Assim, a melhoria deste solo é importante, mesmo que não seja radical, até mesmo para viabilizar seu uso como fundação do pavimento.

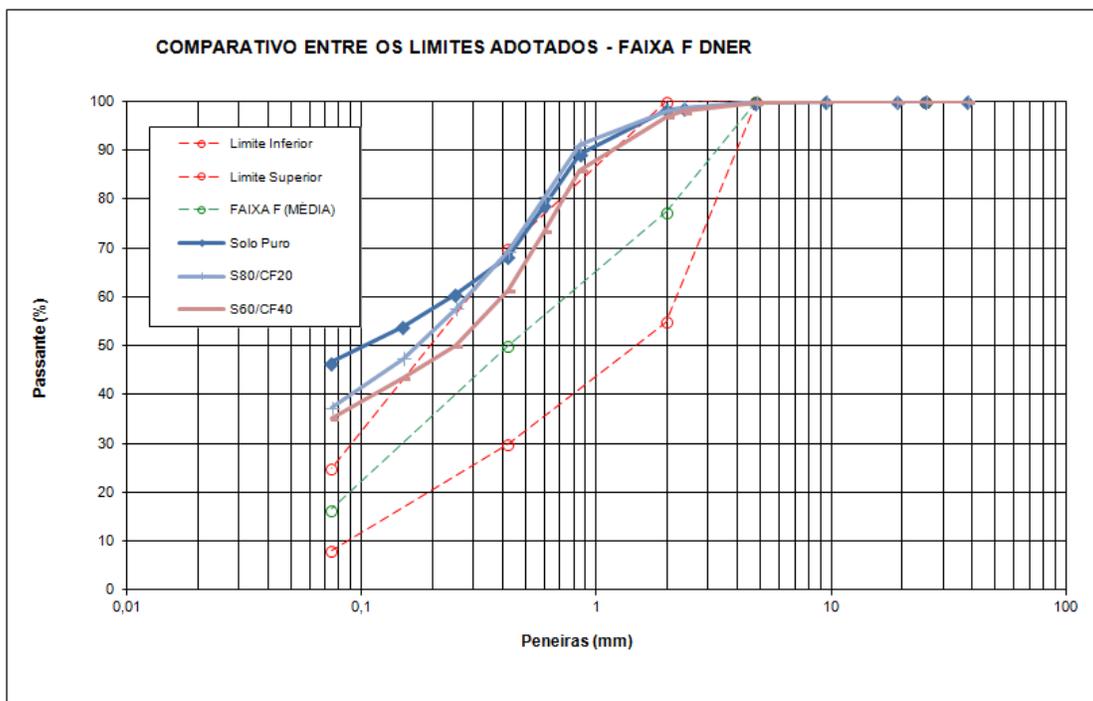


Figura 4.2 – Comparação entre as granulometrias das misturas e solo puro deste estudo com a faixa granulométrica F para base estabilizada da norma DNIT 141/2010

4.1.4. Classificação SUCS

Usando os limites de Atterberg obtiveram-se, para cada amostra, os seguintes índices de classificação SUCS (sistema elaborado pelo professor Casagrande em 1948) que estão listados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Índices de classificação SUCS para cada amostra deste estudo

| Material ou mistura | Índice |
|---------------------|--------|
| Solo | SM |
| S80/CF20 | SM |
| S60/CF40 | SM |

Através dos índices podemos concluir por esta classificação que o solo pertence ao grupo das areias siltosas (SM) e a adição de cinzas de fundo de RSU na mistura não melhora significativamente seu comportamento, sendo ainda considerada uma areia siltosa.

4.1.5. Classificação TRB

Amplamente empregada em todo o mundo para aplicações rodoviárias, esta

classificação de solos é feita com base na granulometria e nos limites de Atterberg do material. É normatizada pela AASHTO M145 (1973).

As classificações de cada amostra encontram-se relacionadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Índices de classificação TRB para cada amostra

| Material ou mistura | Índice |
|---------------------|--------|
| Solo | A-7-6 |
| S80/CF20 | A-7-6 |
| S60/CF40 | A-7-6 |

A introdução das cinzas fez diminuir o índice de finos do solo como pode ser visto na análise granulométrica, porém o fato não mudou sua classificação TRB.

De acordo com esta classificação pode-se observar que o solo puro teria comportamento ruim, não sendo sequer recomendável para subleito. A adição de cinzas de fundo de RSU não melhoram suas condições, apesar de a cinza de fundo tornar a granulometria um pouco mais grosseira e adequada para utilização como subleito, ainda conserva características semelhantes aos solos da classe A-7 pelo índice composto que apresenta. A mistura S60/CF40 encontra-se no limiar entre a classificação A-7-6 e A-2-7, mas como passou 35,2% de solo na peneira #200 (0,2% a mais), então ainda é classificada como A-7-6.

Esta classificação tem sido muito criticada quanto à sua real avaliação dos solos, quando este é laterítico, o que não é o caso do solo estudado neste trabalho.

4.2. Ensaio de Caracterização Química

4.2.1. Dosagem Físico-Química da Cal

Os resultados do ensaio de dosagem pelo método físico-químico para a combinação de solo-cinza de fundo de RSU (16 g de solo + 4 g de cinza = 20 g), visando determinar a percentagem ideal de cal a ser adicionada à mistura, estão apresentados na Tabela 4.7 e na Figura 4.3. A partir destes dados, os cálculos da variação volumétrica percentual ΔV (%) são realizados da seguinte forma:

$$\text{Vol. (0\%)} = 36 \text{ cm}^3 \text{ ----- } \Delta V (\%) = 0$$

$$\text{Vol. (2\%)} = 57 \text{ cm}^3 \text{ ----- } \Delta V (\%) = ((57 - 36) / 36) \times 100 = 58$$

Vol. (4%) = 57 cm³ ----- $\Delta V (\%) = ((57 - 36) / 36) \times 100 = 58$
 Vol. (6%) = 67 cm³ ----- $\Delta V (\%) = ((67 - 36) / 36) \times 100 = 86$
 Vol. (8%) = 67 cm³ ----- $\Delta V (\%) = ((67 - 36) / 36) \times 100 = 86$
 Vol. (10%) = 67 cm³ ----- $\Delta V (\%) = ((67 - 36) / 36) \times 100 = 86$
 Vol. (12%) = 70 cm³ ----- $\Delta V (\%) = ((70 - 36) / 36) \times 100 = 94$
 Vol. (15%) = 71 cm³ ----- $\Delta V (\%) = ((71 - 36) / 36) \times 100 = 97$

Tabela 4.7 - Valores obtidos pelo método de dosagem físico-química para o solo ensaiado neste trabalho

| MÉTODO FÍSICO-QUÍMICO DE DOSAGEM DE SOLO-CIMENTO | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|----|----|----|----|----|----|----|----|------------------------|-----|-----|-----|------------|-----|--------|
| LABORATÓRIO DE GEOTECNIA - COPPE/ UFRJ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| AMOSTRA: Solo + Cinza de fundo de RSU + Cal | | | | | | | | | | | | | | DATA: | | |
| | | | | | | | | | | | | | | 29/01/2013 | | |
| INTERESSADO: Igor Dourado | | | | | | | | | | OPERADOR: Igor Dourado | | | | | | |
| Cal (%) | LEITURAS (mL) | | | | | | | | | | | | | | | ΔV (%) |
| | 1ª | 2ª | 3ª | 4ª | 5ª | 6ª | 7ª | 8ª | 9ª | 10ª | 11ª | 12ª | 13ª | 14ª | 15ª | |
| 0 | 27 | 31 | 33 | 34 | 34 | 35 | 36 | 35 | 35 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 0 |
| 2 | 36 | 45 | 47 | 51 | 57 | 57 | 56 | 55 | 54 | 54 | 52 | 51 | 49 | 48 | 48 | 58 |
| 4 | 33 | 40 | 40 | 46 | 52 | 52 | 51 | 52 | 52 | 56 | 57 | 57 | 56 | 56 | 55 | 58 |
| 6 | 35 | 43 | 45 | 48 | 53 | 53 | 54 | 54 | 54 | 58 | 59 | 61 | 61 | 67 | 66 | 86 |
| 8 | 36 | 42 | 45 | 50 | 55 | 55 | 55 | 56 | 56 | 61 | 61 | 63 | 63 | 67 | 66 | 86 |
| 10 | 41 | 45 | 46 | 51 | 56 | 56 | 57 | 57 | 57 | 63 | 62 | 64 | 64 | 67 | 66 | 86 |
| 12 | 40 | 48 | 50 | 53 | 57 | 57 | 57 | 58 | 59 | 63 | 63 | 65 | 66 | 70 | 68 | 94 |
| 15 | 42 | 49 | 52 | 54 | 59 | 59 | 59 | 60 | 60 | 64 | 64 | 66 | 66 | 71 | 69 | 97 |

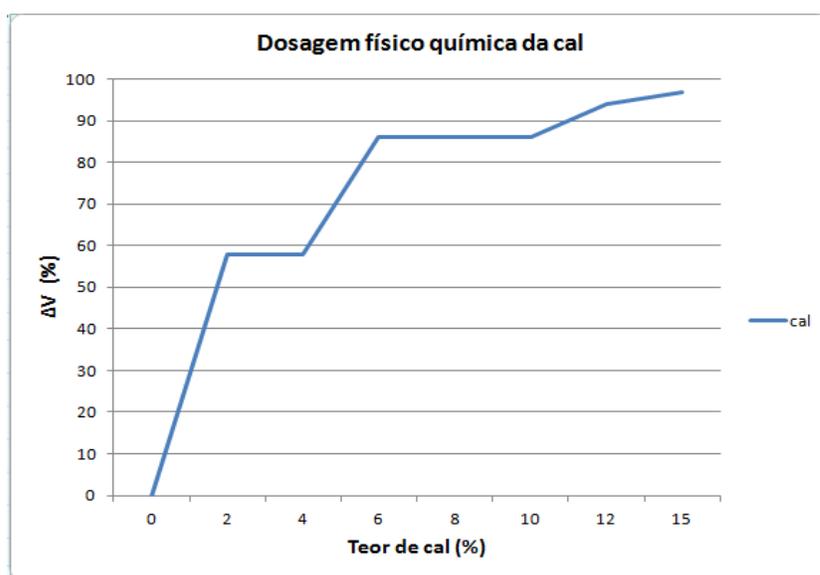


Figura 4.3 – Variação volumétrica percentual em relação a percentagem de cal adicionada à mistura

Analisando a Tabela 4.7, pode-se observar que dentro da faixa de teor de cal estudada neste trabalho não foi possível determinar com certeza qual a porcentagem necessária para alcançar a estabilização química da mistura, pois não houve um ponto de máximo no gráfico da Figura 4.3, porém, como a diferença entre as variações volumétricas está diminuindo, é possível que a mistura esteja alcançando sua estabilização em um valor próximo aos 15% de adição de cal.

No entanto, cabe ressaltar que o uso da cal foi proposto somente para tornar a mistura um “solo melhorado”, sem pretensão de atingir a condição de solo estabilizado quimicamente. Portanto, o teor de 3% tem atuação moderada, mas é um valor viável economicamente.

4.3. Ensaio de Caracterização Mecânica

4.3.1. Ensaio de Compactação

Na Figura 4.4 estão apresentadas as curvas de compactação do solo e das misturas do solo com cinza de fundo, com e sem cal. Na Tabela 4.8 estão apresentados os valores de umidade ótima e peso específico aparente máximo do solo e das misturas.

Tabela 4.8 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

| Solo ou Mistura | w_{otm} (%) | γ_{dmax} (g/cm ³) |
|-----------------|---------------|--------------------------------------|
| Solo | 17,1 | 1,736 |
| S80/CF20 | 18 | 1,618 |
| C60/CF40 | 22,4 | 1,548 |
| C77/CF20/C3 | 20,5 | 1,570 |

Através dos ensaios de compactação, conclui-se que a introdução da cinza de fundo aumentou a umidade necessária para se chegar ao nível ótimo e quanto maior o teor de cinza de fundo na mistura, maior sua umidade ótima e menor a massa específica aparente seca, como pode ser visto na Figura 4.4. Neste caso aconteceu justamente o oposto do ensaio de Vizcarra (2010), já que para o solo por ele utilizado quanto maior o teor de cinza de fundo de RSU na mistura, menor foi sua umidade ótima. Isto se deve ao fato de o solo utilizado na mistura de Vizcarra (2010) ser de natureza argilosa, enquanto o solo do presente trabalho é um solo siltoso. A diminuição da massa específica aparente seca com o aumento do teor da cinza de fundo nas misturas está de acordo com os resultados de Vizcarra (2010).

Comparando as misturas S80/CF20 e S77/CF20/C3, que possuem o mesmo teor de

cinza de fundo, pode-se perceber que a introdução da cal na mistura aumentou sua umidade ótima e diminuiu a massa específica aparente seca, o que já era esperado, como pode ser visto no trabalho de Bonafe (2004) em ensaio com objetivo semelhante.

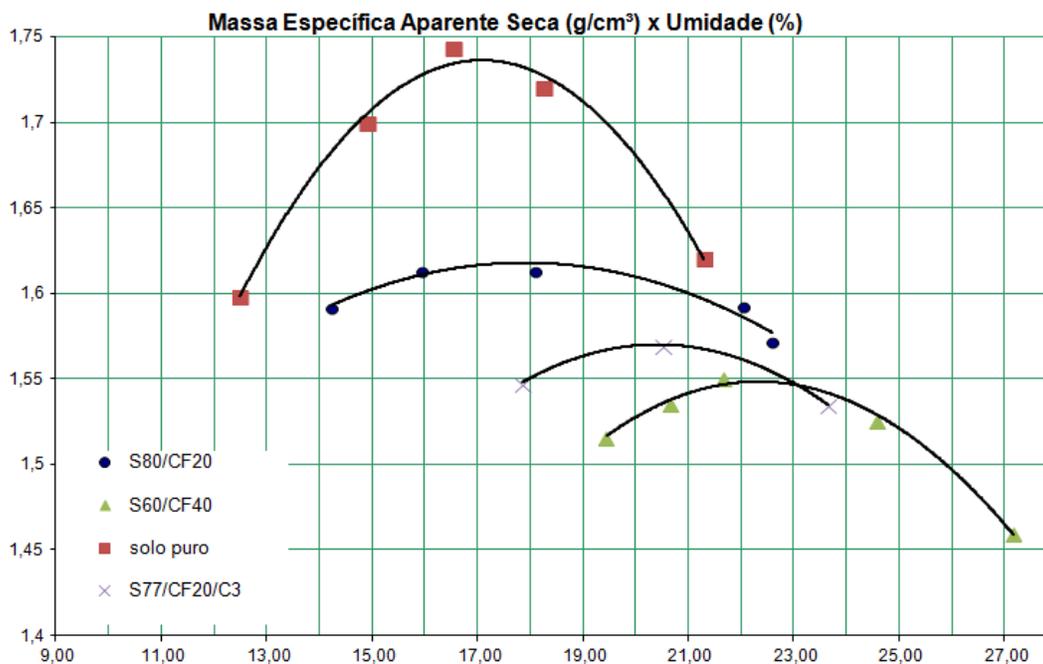


Figura 4.4 – Curvas de compactação de solo e das misturas com 20% (com e sem cal) e 40% de cinza de fundo deste estudo.

4.3.2. Ensaio CBR

Os valores de CBR serão usados apenas como referência, visto o estágio atual das especificações rodoviárias, sabendo que os materiais serão mais bem avaliados em ensaios de módulo de resiliência e de deformação permanente. No entanto, considera-se que os resultados de expansão obtidos neste ensaio são relevantes para conhecimento do material, pois se o pavimento contiver camada de solo expansivo poderá haver acentuada expansão neste, o que causará variações excessivas de volume, produzindo desuniformidade de suporte, deformações do perfil longitudinal do pavimento e sérios prejuízos ao conforto e à qualidade de rolamento.

Os valores obtidos nos ensaios de CBR estão apresentados na Tabela 4.9, onde se pode observar que, após 4 dias de imersão em água, a adição de cinza de fundo de RSU diminuiu a expansibilidade do solo estudado de 2,54% em sua forma pura para 1,54%

quando misturado com 20% de cinza de fundo e para 0,48% quando misturado com 40% de cinza de fundo. Já em relação ao ensaio de CBR, o valor do suporte do solo puro que era de 6% aumentou para 18% com 20% de cinza de fundo na mistura e para 24% com 40% de cinza de fundo na mistura. Os resultados apresentados levam a conclusão de que a inserção de cinza de fundo de RSU torna o solo mais adequado para uso em pavimentação analisando sob o ponto de vista da expansão do material e do CBR.

Tabela 4.9 – Valores de expansão e do CBR após 4 dias de imersão em água

| Material ou mistura | Expansão após 4 dias (%) | CBR (%) |
|----------------------|--------------------------|---------|
| Solo | 2,54 | 6 |
| Mistura 1 (S80/CF20) | 1,54 | 18 |
| Mistura 2 (S60/CF40) | 0,48 | 24 |

4.3.3. Módulo de Resiliência (MR)

Os ensaios de MR das misturas foram realizados em triplicata, ou seja, três corpos de prova moldados nas mesmas condições de umidade e energia, com o objetivo de avaliar a repetibilidade dos resultados. Para o solo puro foi realizado apenas um ensaio. Os modelos de análise utilizados foram:

- i) Para tensão desvio: $MR = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2}$
- ii) Para tensão confinante: $MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2}$
- iii) Para tensão desvio e tensão confinante: $MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$ (Modelo composto)

A partir das deformações resilientes registradas, determinam-se os valores de módulo de resiliência em função dos pares de tensão σ_d e σ_3 aplicados nos corpos de prova. Ao término do ensaio são gerados gráficos em escala logarítmica que representam os resultados da relação entre módulo de resiliência e as tensões σ_d e σ_3 aplicadas.

Da Figura 4.5 a Figura 4.8 estão apresentadas as linhas de tendência geradas pelos gráficos concebidos pelos modelos de análise. Na Figura 4.5 pode-se observar que a adição de cinzas de fundo não trouxe melhoria em termos de deformabilidade ao solo puro, ficando as linhas de tendência das misturas na mesma ordem de grandeza da linha do solo puro. Já para a adição de 3% de cal à mistura com 20% de cinza de fundo, conforme apresentado da Figura 4.6 a Figura 4.8, o ensaio foi realizado em diferentes tempos de cura para avaliar sua

evolução, tendo sido ensaiados a 34, 61 e 90 dias de cura. A mistura apresentou uma sensível melhoria já com 34 dias de cura, com a linha de tendência desta mistura ficando destacadamente acima das linhas de tendência de solo puro e de solo com 20% e 40% de cinza de fundo. Aos 61 dias observa-se uma estagnação da evolução do módulo de resiliência. Aos 90 dias as linhas de tendência continuam estagnadas na mesma ordem de grandeza, sem alteração pronunciada. Como se pode observar na Tabela 4.10 e na Tabela 4.11, módulos resilientes do solo puro e da mistura com 20% de cinzas dependem mais da tensão desvio e os módulos de resiliência das misturas com 40% de cinzas e com 20% de cinzas e 3% de cal são mais dependentes da tensão confinante, pois o coeficiente de determinação (R^2) destes é maior. Podemos observar que as linhas de tendência para as análises das misturas com apenas solo e cinza de fundo têm coeficientes de determinação em geral muito baixos.

Tabela 4.10 – Coeficientes do modelo de análise para tensão confinante dos materiais deste estudo

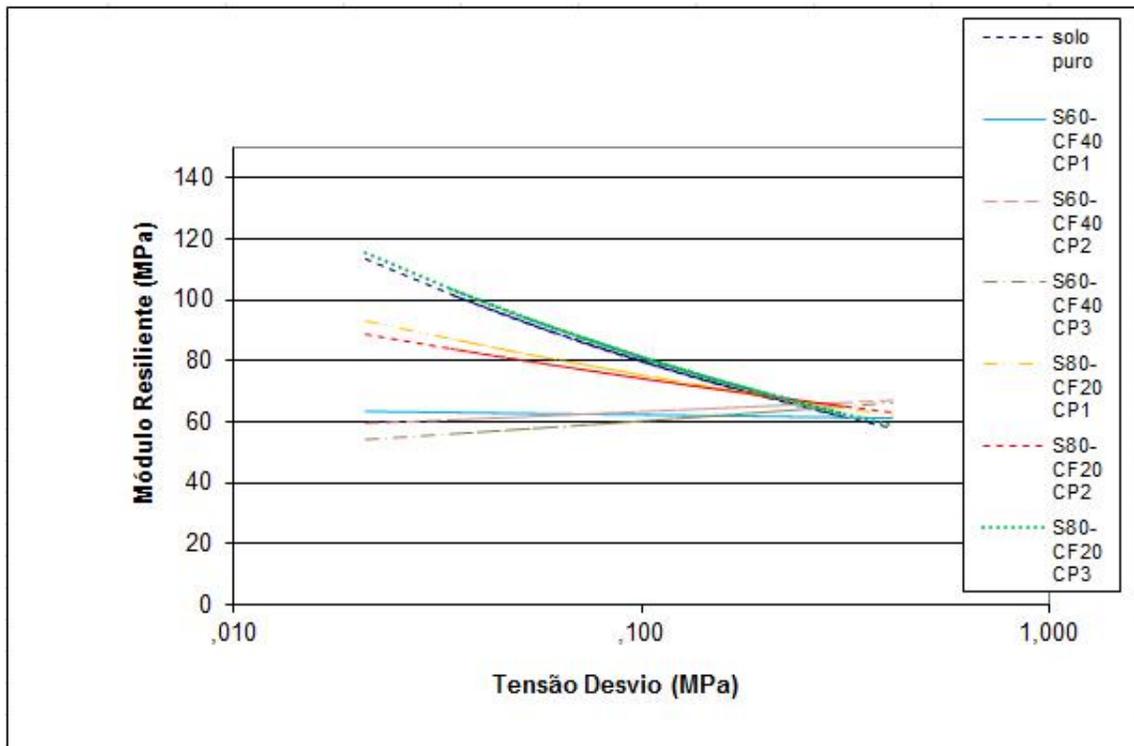
| Material/mistura | K_1 | K_2 | R^2 |
|-----------------------------|----------|--------|-------|
| Solo puro | 57,400 | -0,112 | 0,070 |
| S60/CF40 – CP1 | 124,500 | 0,238 | 0,233 |
| S60/CF40 – CP2 | 127,700 | 0,245 | 0,290 |
| S60/CF40 – CP3 | 137,200 | 0,287 | 0,396 |
| S80/CF20 – CP1 | 73,100 | -0,009 | 0,001 |
| S80/CF20 – CP2 | 77,800 | 0,018 | 0,003 |
| S80/CF20 – CP3 | 57,600 | -0,116 | 0,062 |
| S77/CF20/C3 – CP1 – 34 dias | 1963,400 | 0,470 | 0,933 |
| S77/CF20/C3 – CP2 – 34 dias | 1458,600 | 0,270 | 0,860 |
| S77/CF20/C3 – CP3 – 34 dias | 1369,800 | 0,205 | 0,835 |
| S77/CF20/C3 – CP1 – 61 dias | 1580,200 | 0,407 | 0,900 |
| S77/CF20/C3 – CP2 – 61 dias | 1234,600 | 0,267 | 0,790 |
| S77/CF20/C3 – CP3 – 61 dias | 1349,200 | 0,279 | 0,785 |
| S77/CF20/C3 – CP1 – 90 dias | 1806,900 | 0,390 | 0,874 |
| S77/CF20/C3 – CP2 – 90 dias | 1379,400 | 0,271 | 0,848 |
| S77/CF20/C3 – CP3 – 90 dias | 1526,500 | 0,320 | 0,897 |

Tabela 4.11 – Coeficientes do modelo de análise para tensão desvio dos materiais deste estudo

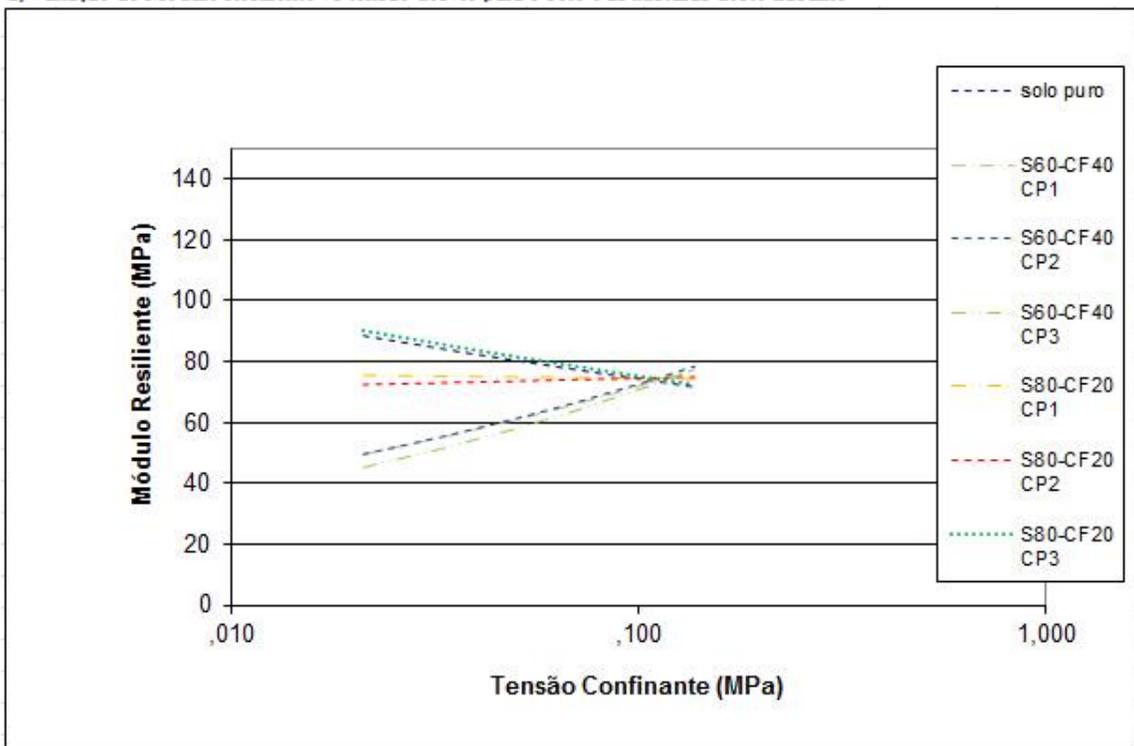
| Material/mistura | K ₁ | K ₂ | R ² |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Solo puro | 47,400 | -0,226 | 0,430 |
| S60/CF40 – CP1 | 60,600 | -0,012 | 0,001 |
| S60/CF40 – CP2 | 69,500 | 0,040 | 0,012 |
| S60/CF40 – CP3 | 70,400 | 0,068 | 0,034 |
| S80/CF20 – CP1 | 55,100 | -0,136 | 0,203 |
| S80/CF20 – CP2 | 57,000 | -0,115 | 0,159 |
| S80/CF20 – CP3 | 48,100 | -0,227 | 0,354 |
| S77/CF20/C3 – CP1 – 34 dias | 961,900 | 0,278 | 0,497 |
| S77/CF20/C3 – CP2 – 34 dias | 939,300 | 0,147 | 0,387 |
| S77/CF20/C3 – CP3 – 34 dias | 972,500 | 0,108 | 0,349 |
| S77/CF20/C3 – CP1 – 61 dias | 860,400 | 0,246 | 0,498 |
| S77/CF20/C3 – CP2 – 61 dias | 787,400 | 0,138 | 0,322 |
| S77/CF20/C3 – CP3 – 61 dias | 840,500 | 0,143 | 0,313 |
| S77/CF20/C3 – CP1 – 90 dias | 1028,000 | 0,243 | 0,516 |
| S77/CF20/C3 – CP2 – 90 dias | 884,900 | 0,146 | 0,375 |
| S77/CF20/C3 – CP3 – 90 dias | 911,400 | 0,177 | 0,414 |

As misturas com somente solo e cinza de fundo tiveram coeficientes de determinação (R²) muito baixos, sendo suas linhas de tendência pouco representativas. No entanto, estas foram apresentadas nos gráficos da Figura 4.5 a Figura 4.8, pois demonstraram corretamente o comportamento dos valores de módulo de resiliência de cada mistura com o aumento das tensões (desvio e confinante) e com o aumento do teor de cinza de fundo, indicando corretamente as condições em que o valor de módulo de resiliência evolui ou retrocede, apesar da imprecisão das linhas de tendência apresentadas nos gráficos.

Para obterem-se melhores coeficientes de determinação, foram feitas análises através do modelo composto para as mesmas misturas. Os coeficientes k₁, k₂ e k₃ do modelo composto foram obtidos através do software STATISTICA e estão apresentados na Tabela 4.12.

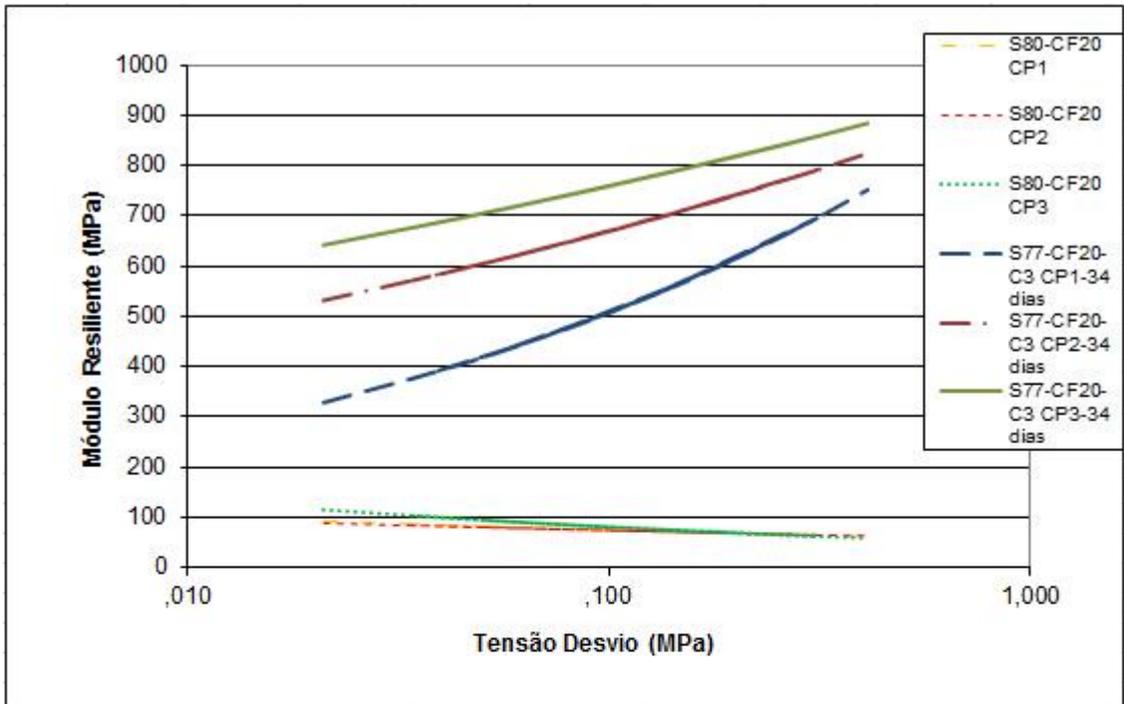


a) Variação do Módulo Resiliente vs tensão desvio para o solo e as misturas deste trabalho

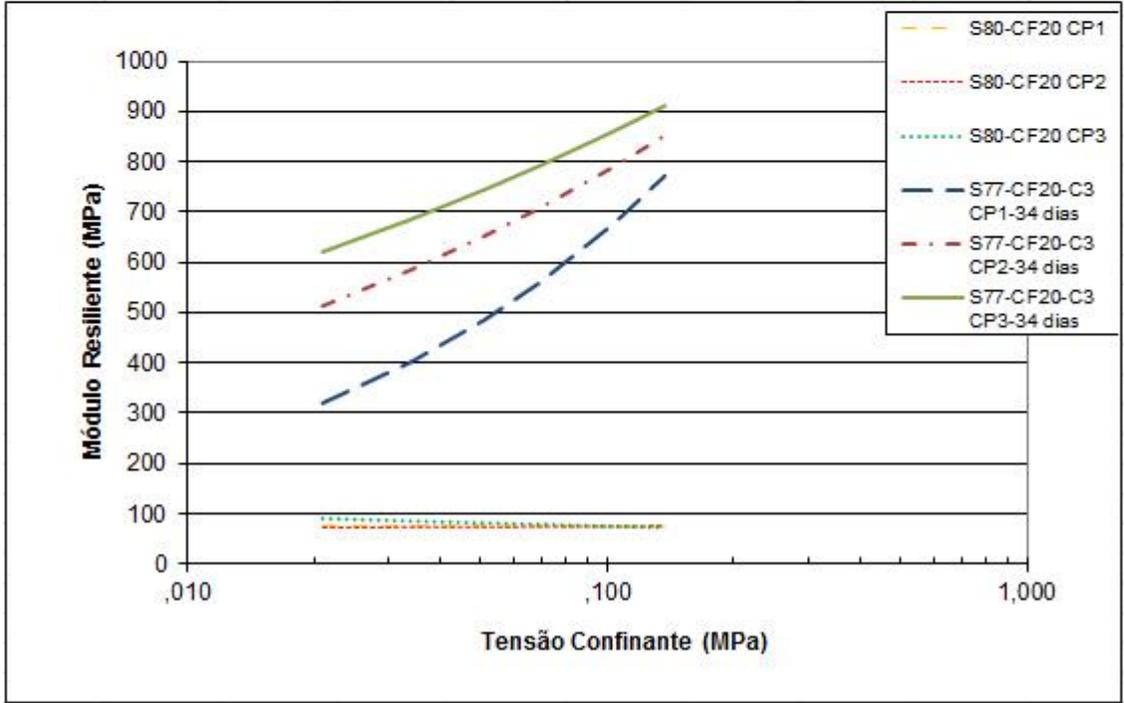


b) Variação do Módulo Resiliente vs tensão confinante para o solo e as misturas deste trabalho

Figura 4.5 – Resultados do ensaio triaxial de carga repetida para o solo puro e para as misturas de solo-cinza de fundo de RSU realizados neste estudo

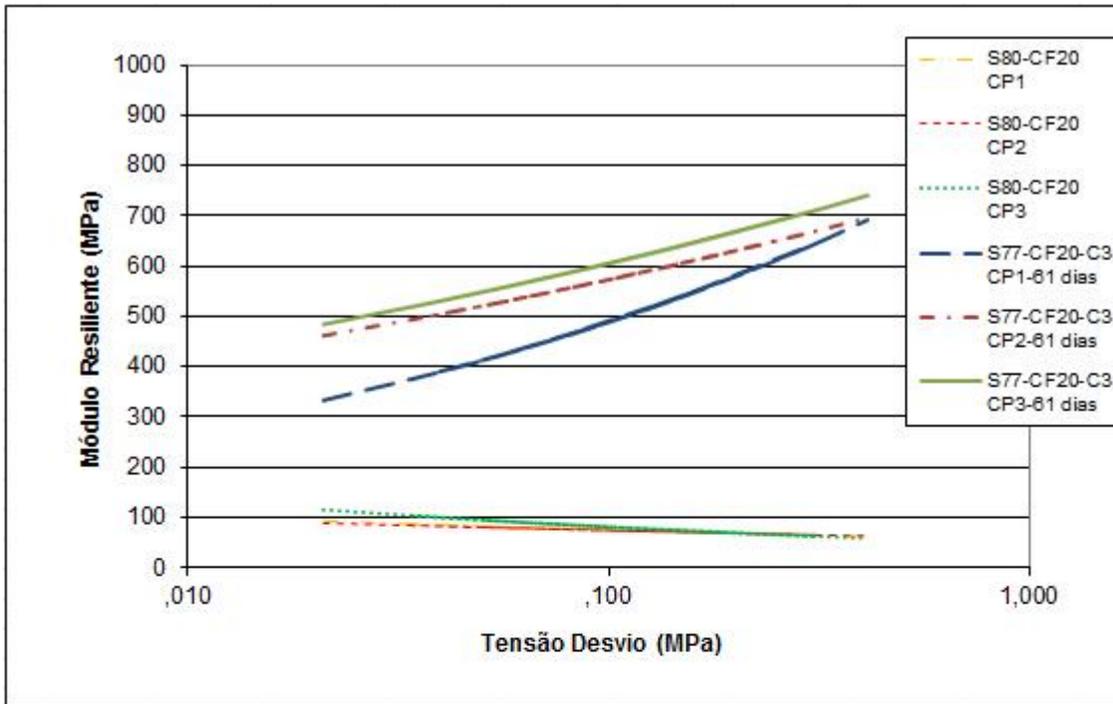


a) Variação do Módulo Resiliente vs. tensão desvio para misturas com 20% de cinza de fundo com e sem cal deste estudo

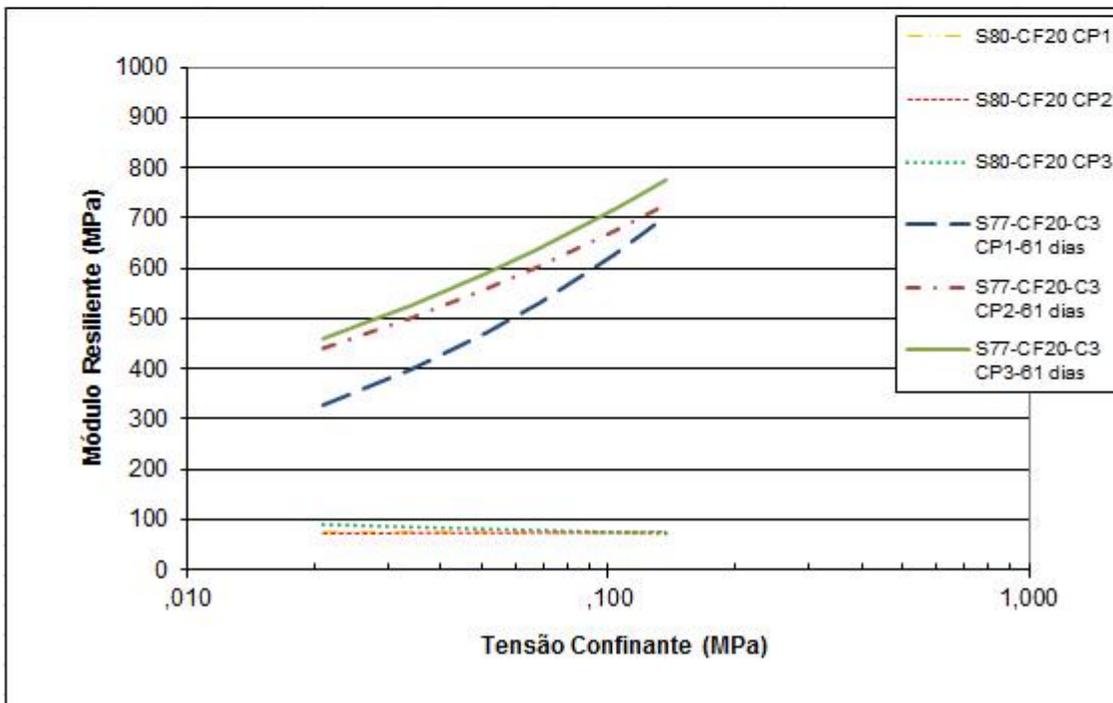


b) Variação do Módulo Resiliente vs. tensão confinante para misturas com 20% de cinza de fundo com e sem cal deste estudo

Figura 4.6 – Resultados do ensaio triaxial de carga repetida para solo puro e para misturas com 20% de cinza de fundo de RSU, sem cal ou com 3% de cal e 34 dias de cura

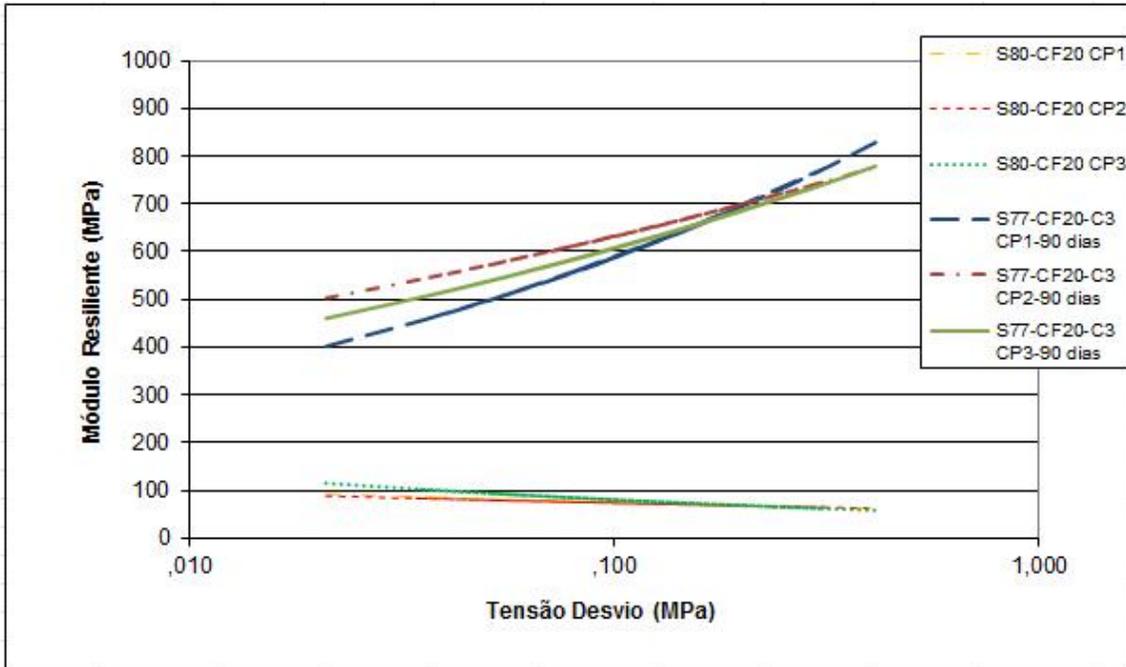


a) Variação do Módulo Resiliente vs. tensão desvio para misturas com 20% de cinza de fundo com e sem cal deste estudo

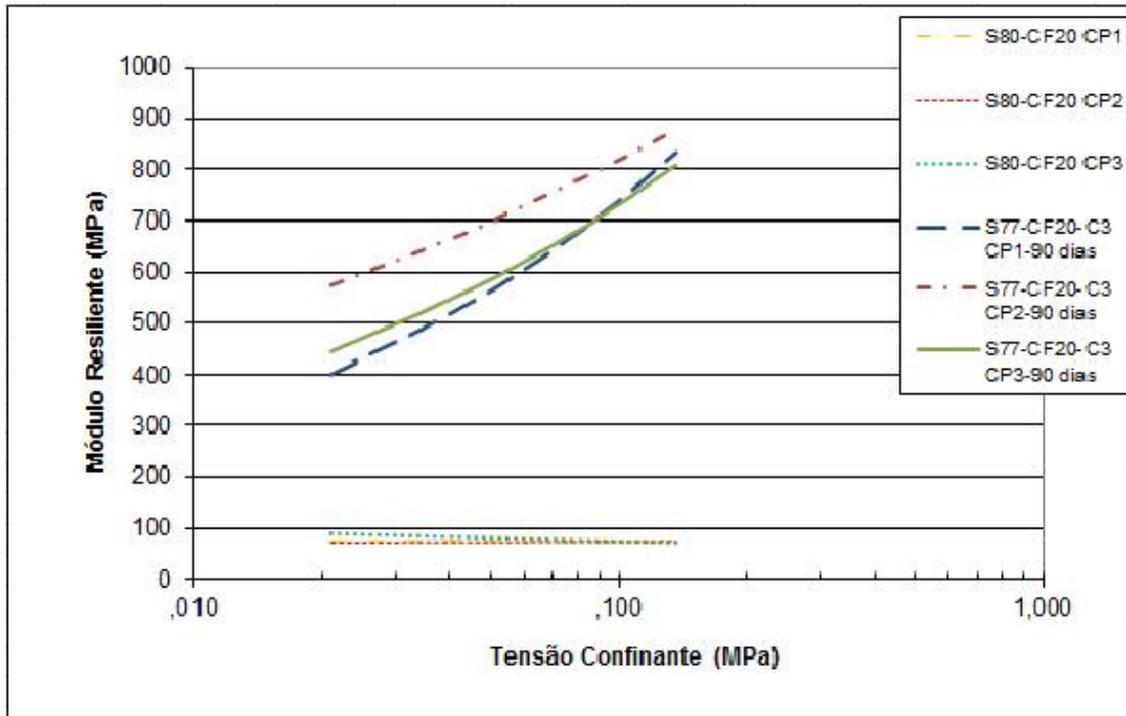


b) Variação do Módulo Resiliente vs. tensão confinante para misturas com 20% de cinza de fundo com e sem cal deste estudo

Figura 4.7 – Resultados do ensaio triaxial de carga repetida para solo puro e para misturas com 20% de cinza de fundo de RSU, sem cal ou com 3% de cal e 61 dias de cura



a) Variação do Módulo Resiliente vs. tensão desvio para misturas com 20% de cinza de fundo com e sem cal deste estudo



b) Variação do Módulo Resiliente vs. tensão confinante para misturas com 20% de cinza de fundo com e sem cal deste estudo

Figura 4.8 – Resultados do ensaio triaxial de carga repetida para solo puro e para misturas com 20% de cinza de fundo de RSU, sem cal ou com 3% de cal e 90 dias de cura

Tabela 4.12 – Valores dos coeficientes do modelo composto para cada material ou mistura desta pesquisa

| Material ou mistura | Compactação | | Modulo de resiliencia | | | |
|-------------------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------|--------|----------------|
| | w _{otm} (%) | γ_{dmax} (g/cm ³) | k1 | k2 | k3 | R ² |
| Solo puro | 17,1 | 1,736 | 50,890 | 0,292 | -0,514 | 0,840 |
| S60/CF40 CP1 | 22,4 | 1,548 | 127,930 | 0,591 | -0,436 | 0,755 |
| S60/CF40 CP2 | 22,4 | 1,548 | 147,660 | 0,539 | -0,318 | 0,726 |
| S60/CF40 CP3 | 22,4 | 1,548 | 162,030 | 0,592 | -0,320 | 0,820 |
| S80/CF20 CP1 | 18 | 1,618 | 75,300 | 0,313 | -0,400 | 0,749 |
| S80/CF20 CP2 | 18 | 1,618 | 84,900 | 0,354 | -0,390 | 0,765 |
| S80/CF20 CP3 | 18 | 1,618 | 47,050 | 0,269 | -0,571 | 0,775 |
| S77/CF20/C3 34 dias CP1 | 20,5 | 1,57 | 2274,980 | 0,572 | -0,062 | 0,981 |
| S77/CF20/C3 34 dias CP2 | 20,5 | 1,57 | 1572,230 | 0,357 | -0,076 | 0,960 |
| S77/CF20/C3 34 dias CP3 | 20,5 | 1,57 | 1438,860 | 0,283 | -0,077 | 0,949 |
| S77/CF20/C3 61 dias CP1 | 20,5 | 1,57 | 1775,400 | 0,460 | -0,013 | 0,960 |
| S77/CF20/C3 61 dias CP2 | 20,5 | 1,57 | 1363,930 | 0,368 | -0,084 | 0,932 |
| S77/CF20/C3 61 dias CP3 | 20,5 | 1,57 | 1511,420 | 0,443 | -0,171 | 0,838 |
| S77/CF20/C3 90 dias CP1 | 20,5 | 1,57 | 1846,070 | 0,373 | 0,029 | 0,939 |
| S77/CF20/C3 90 dias CP2 | 20,5 | 1,57 | 1473,220 | 0,348 | -0,069 | 0,949 |
| S77/CF20/C3 90 dias CP3 | 20,5 | 1,57 | 1629,860 | 0,406 | -0,080 | 0,974 |

No anexo A estão apresentadas as superfícies tridimensionais geradas pelo programa baseadas no modelo composto.

Para efeito de comparação, na Tabela 4.13 estão apresentadas as médias, o ponto de menor tensão desvio ($\sigma_d = 0,021$) e o ponto de maior tensão desvio ($\sigma_d = 0,412$) dos resultados de módulo de resiliência do presente trabalho, do trabalho de Vizcarra (2010) e de Lopes (2011). Os resultados dos módulos de resiliência de Vizcarra (2010) e Lopes (2011) foram estimados através da aplicação dos coeficientes k1, k2 e k3 informados nos respectivos trabalhos na fórmula do modelo composto. Cabe ressaltar que a cinza de fundo utilizada por Vizcarra (2010) era a mesma deste trabalho e que a cinza utilizada por Lopes (2011) era cinza de fundo de carvão. Na tabela pode-se observar que o solo utilizado por Vizcarra (2010) tinha características mecânicas melhores que o deste trabalho e o de Lopes (2011) e que a adição de cinza de fundo de RSU não representa grande ganho sob o aspecto resiliente. Já no trabalho de Lopes (2011) observa-se que a adição de cinza de fundo de carvão melhora o comportamento resiliente do solo. A adição de pequena percentagem de cal

(3%) traz grande melhoria no comportamento resiliente das misturas em relação ao solo original como se pode ver nos resultados de Lopes (2011) e principalmente nos resultados deste trabalho.

Tabela 4.13 – Valores de Módulo de Resiliência médio, para $\sigma_d = 0,021$ e para $\sigma_d = 0,412$ deste trabalho, de Vizcarra (2010) e de Lopes (2011)

| Material | MR médio | MR $\sigma_d = 0,021$ | MR $\sigma_d = 0,412$ | Referencia |
|-----------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| Solo puro | 297 | 473 | 189 | Vizcarra (2010) |
| S80/CF20 | 289 | 550 | 149 | Vizcarra (2010) |
| S60/CF40 | 224 | 372 | 135 | Vizcarra (2010) |
| Solo puro | 108 | 99 | 112 | Lopes (2011) |
| S70/CF30 | 165 | 127 | 200 | Lopes (2011) |
| S60/CF40 | 162 | 110 | 214 | Lopes (2011) |
| S70/CF27/C3 90 dias de cura | 297 | 217 | 375 | Lopes (2011) |
| S60/CF37/C3 90 dias de cura | 275 | 188 | 362 | Lopes (2011) |
| Solo puro | 82 | 163 | 74 | Presente trabalho |
| S60/CF40 | 65 | 112 | 87* | Presente trabalho |
| S80/CF20 | 85 | 199 | 81 | Presente trabalho |
| S77/CF20/C3 90 dias de cura | 647 | 558 | 840 | Presente trabalho |

*Para $\sigma_d = 0,275$

4.4. Dimensionamento de pavimento típico

Com o intuito de avaliar a adição das cinzas e da cal ao solo, utilizou-se o programa computacional SisPav (FRANCO, 2007) para dimensionar a espessura da camada que será composta pelos materiais ensaiados neste trabalho. Como os ensaios foram feitos em triplicata, a exceção do solo puro, para se obter maior representatividade, os parâmetros k_1 , k_2 e k_3 usados foram obtidos através da média aritmética dos resultados determinados pelo programa STATISTICA para os ensaios de módulo de resiliência que estão apresentados na Tabela 4.12.

Adotaram-se os mesmos parâmetros de tráfego e de estrutura utilizados por Vizcarra (2010) a título comparativo. No caso da mistura de solo-cinza volante deste autor, para o tempo de 10 anos a espessura da camada de base seria de 10 cm para 20% de cinza volante e

23 cm para 40% de cinza volante. Para o solo puro a espessura seria de 13 cm, observando-se melhoria com apenas 20% da cinza na mistura e piora acentuada no comportamento mecânico com 40% de cinza volante na mistura. No entanto, Vizcarra (2010) concluiu que o uso de 20% de cinza volante não é adequado, pois a redução de expansibilidade não foi o suficiente para utilização como base e sub-base e a adição de 40% de cinza volante é adequada para uso em camada de base e sub-base de uma rodovia de baixo volume de tráfego, pois a cinza reduziu a expansibilidade do solo para menos de 0,5%.

No dimensionamento da camada de base do pavimento para um tempo de vida de 10 anos, dentro dos critérios apresentados no item 3.4, tanto o solo puro quanto as misturas com apenas cinza de fundo não conseguiram ser dimensionadas em uma espessura abaixo do limite superior de espessura da camada de base (60 cm) estabelecido, o que os torna inadequados para o uso na base do pavimento. Com a adição de cal, para os mesmos critérios de projeto e estrutura de pavimento como a apresentada na Figura 3.18, as espessuras se enquadraram dentro dos limites de espessura da camada de base (10-60 cm) e estão apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Valores arredondados das espessuras dimensionadas pelo SisPav para um tempo de vida de 10 anos para as misturas S77/CF20/C3 deste trabalho em diferentes tempos de cura

| Mistura | Espessura da camada (cm) |
|-------------------------------|--------------------------|
| S77/CF20/C3 – 34 dias de cura | 12 |
| S77/CF20/C3 – 61 dias de cura | 18 |
| S77/CF20/C3 – 90 dias de cura | 14 |

Observa-se que a adição de cal melhora o comportamento mecânico da mistura solo-cinza de fundo, fazendo com que se torne viável para ser utilizada em base de pavimento, pois apresenta espessura próxima da mínima usualmente admitida pelos órgãos públicos (15 cm) para base. Houve uma leve piora da mistura com 61 dias de cura em relação à mesma mistura com 34 dias de cura, possivelmente devido à discrepâncias nas medições do ensaio de módulo de resiliência. Aos 90 dias de cura, a espessura torna a diminuir, ficando um pouco acima da espessura de 34 dias, mostrando que o tempo de cura não influenciou no comportamento resiliente durante o tempo pesquisado.

Nas mesmas condições anteriormente citadas, utilizando a mistura de solo-cinza de fundo-cal na base do pavimento, mas adicionando uma camada de 20 cm de reforço de subleito entre a base e o subleito composta pela mistura de S60/CF40, que apresentou expansibilidade de 0,48% em ensaio realizado neste trabalho, e também considerando a vida de projeto de 10 anos, a espessura calculada para a camada de base fica dentro dos limites sem sofrer grandes alterações em relação à Tabela 4.14. Os resultados para este cálculo estão apresentados na Tabela 4.15. O desenho esquemático da nova estrutura está apresentado na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Estrutura do Pavimento Típico adotada para análise mecânica-empírica com camada de S60/CF40 como reforço de subleito

Tabela 4.15 – Valores arredondados das espessuras dimensionadas pelo SisPav para um tempo de vida de 10 anos para as misturas S77/CF20/C3 em diferentes tempos de cura na camada de base e misturas S60/CF40 no subleito

| Mistura | Espessura da camada (cm) |
|-------------------------------|--------------------------|
| S77/CF20/C3 – 34 dias de cura | 13 |
| S77/CF20/C3 – 61 dias de cura | 18 |
| S77/CF20/C3 – 90 dias de cura | 15 |

No anexo B estão apresentados os relatórios gerados pelo SisPav para os tempos de cura da Tabela 4.14 e da Tabela 4.15.

5. Considerações finais

5.1. Conclusões

Este trabalho buscou avaliar as contribuições da adição de cinza de fundo de RSU a um solo granular com baixa capacidade de suporte. Para isso, foram realizados estudos com o objetivo de caracterizar física, química e mecanicamente o material resultante da mistura de solo e cinza de fundo de RSU, com ocasional adição de cal para avaliação do módulo de resiliência. A mistura com cal foi ensaiada em diferentes idades, para determinar a influência do tempo de cura nas propriedades. O principal intuito deste trabalho foi o de tentar melhorar as condições de um solo inadequado para fins de construção de pavimentos com o uso de cinzas de fundo de RSU, dando a esta um destino mais nobre e útil do que a simples deposição em aterros.

Analisando os resultados apresentados no capítulo anterior, foi possível chegar às conclusões apresentadas neste capítulo.

As principais observações sobre a adição de cinzas de fundo de RSU ao solo estão listadas abaixo:

- A mistura deste solo expansivo com a cinza de fundo de RSU diminui a expansão de forma tal que pode viabilizar seu emprego como camada final de terraplenagem, sendo uma alternativa barata de estabilização granulométrica para este fim, evitando que seja necessária a retirada desta camada no campo.
- Os módulos de resiliência obtidos mostram que somente a utilização de cinzas de fundo de RSU na mistura com o solo não proporcionou melhoria significativa em relação à deformabilidade do solo puro a ponto de torná-lo viável para utilização em base de pavimentos de baixo volume.
- As análises mecânica-empíricas realizadas neste estudo com os valores dos módulos de resiliência obtidos nos ensaios mostram que a adição de cinzas ao solo juntamente com pequena quantidade de cal (3%) constitui um composto viável para utilização em base de pavimentos de baixo volume de tráfego.
- A classificação SUCS indica que o solo puro utilizado é uma areia siltosa (SM). A classificação TRB diz que é um solo do tipo A-7-6. Já a classificação

MCT diz que é um solo NS' (não laterítico e silto-arenoso). Todas as classificações indicam que o comportamento mecânico deste material é inadequado para utilização em camadas de pavimentos. Mesmo como subleito não é indicado seu uso, devido à expansão elevada. No entanto, a proporção de 40% de cinza de fundo diminui radicalmente a expansibilidade, permitindo o uso deste material em reforço de subleito e em sub-base em relação aos parâmetros tradicionais.

- Os parâmetros estimados pelo ensaio de compactação (γ_{dmax} e W_{otm}) são influenciados pelo teor de cinza adicionado à mistura. Quanto maior for a adição de cinzas de fundo ao material, maior será a sua umidade ótima e menor será sua massa específica aparente máxima;
- Analisando os ensaios de módulo de resiliência, pode-se chegar às seguintes conclusões:
 - Influência da cal: A adição de cal à mistura com 20% de cinza de fundo se mostrou um fator positivo para a deformabilidade, apresentando valores muito maiores de MR em relação à mistura sem a cal. O baixo índice pozolânico da cinza de fundo torna necessário a adição de cal para obter melhores resultados neste ensaio.
 - Tempo de cura da cal: A cura de 90 dias não apresentou grande influência para a mistura com cal, não ocasionando mudanças consideráveis no comportamento resiliente da mistura nos diferentes tempos de cura ensaiados. Deve-se considerar, no entanto, que é sabido que a cal precisa de muito mais tempo para desenvolver todas as reações, diferente do cimento. E também, como mostrou o método físico-químico de dosagem o teor de cal para estabilizar este solo seria muito maior.
 - Teor de cinzas: A adição de cinzas de fundo não trouxe grande evolução do comportamento resiliente em relação ao solo puro, tendo a mistura com 20% de cinza alcançado o melhor resultado entre as misturas ensaiadas.

- Coeficiente de determinação (R^2): Observando o coeficiente de determinação (R^2) dos gráficos de $MR \times \sigma$ apresentados no item 4.3.3. gerados para cada um dos corpos de prova ensaiados, percebe-se que o comportamento resiliente do solo e da mistura com 20% de cinza é dependente principalmente da tensão desvio. Já a mistura com 40% de cinza e a mistura 20% de cinza e 3% de cal é mais dependente da tensão confinante. Os coeficientes para misturas de solo-cinza de fundo são baixos, alcançando melhores resultados na análise pelo modelo composto.
- Quanto à expansibilidade e CBR, a cinza teve influência favorável. O solo estudado neste trabalho apresentou capacidade de suporte (CBR) de 6% na umidade ótima, com uma expansibilidade de 2,54%. Com a adição de cinzas aumentou o CBR para 18% (S80/CF20) e 24% (S60/CF40) e diminuiu a expansibilidade para 1,54% (S80/CF20) e 0,48% (S60/CF40), o que indica melhoria na sua capacidade de suporte.
- De acordo com o ensaio de dosagem físico-química, o teor de cal ideal a ser adicionado à mistura não foi encontrado na faixa pesquisada de 0 a 15%, estando provavelmente um pouco acima de 15%. Porém, ser o ideal não necessariamente significa que é o mais indicado. Dependendo da necessidade de projeto, o teor de 3% pode ser suficiente para atendê-la.
- O trabalho não teve enfoque principal na viabilidade ambiental, mas de acordo com os ensaios de solubilização realizados em Vizcarra (2010), a cinza de fundo usada neste trabalho é um resíduo não perigoso, não sendo nociva ao ambiente.
- Para ocasiões em que não é possível ou é muito caro trazer um solo melhor para compor as camadas inferiores do pavimento, o estudo provou que é benéfico adicionar cinzas de fundo de RSU a um solo considerado inadequado quanto à expansão. A adição de cinzas de fundo tornou o solo menos expansivo, o que é uma condição importante para uso em pavimentos. E com a adição de pequena quantidade de cal (3% neste trabalho) é possível ter um

material com boas condições para uso em sub-base e até em base de pavimentos para baixo volume de tráfego.

5.2. Sugestões para pesquisas futuras

- Analisar o comportamento de outros teores de cinza de fundo, buscando um teor ideal a ser adicionado ao solo estudado;
- Analisar a influência do tempo de cura das misturas solo-cinza de fundo de RSU sobre o módulo de resiliência;
- Comparar o comportamento do mesmo solo utilizado neste trabalho misturado com cinzas volantes de RSU nos mesmos teores estudados neste trabalho;
- Estudar a adição de cinzas de fundo de RSU em solos com características diferentes ao deste trabalho;
- Estudar a adição de cinzas de outra natureza, como Resíduos Sólidos Industriais (RSI) ou Resíduos de Serviços de Saúde (RSS), ao solo estudado.

Referencias Bibliográficas

ALMEIDA, G. C. P. Apostila de Caracterização Física e Classificação dos Solos. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2005.

ALMEIDA, R. M. S. Estabilização de areias monogranulares para fins rodoviários – Estudo aplicado à região de Mira. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro. Aveiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2009. Disponível em: http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/noticias_eventos/Panorama2009.pdf Acesso 07 jan 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2011. Disponível em: http://www.jbrj.gov.br/a3p_site/pdf/ABRELPE%20Panorama%202001%20RSU-1.pdf Acesso 07 jan 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12253: Solo-cimento Dosagem para Emprego como Camada no Pavimento, 2012.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J.B. Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros. 1ª Ed. Programa Asfalto nas Universidades. Petrobras Distribuidora S.A., 2008.

CAIXETA, D.M. Geração de Energia Elétrica a partir da Incineração do Lixo Urbano: O Caso de Campo Grande/MS. Monografia de Pós-Graduação em Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável. Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

CASANOVA, F. J.; CERATTI, J. A.; RODRIGUES, M. G. M. Procedimento para a dosagem físico-química do solo-cimento. In: Reunião de Pavimentação, 25. Aracaju, 1992

COMBS, S. THE ENERGY REPORT, 2008. Disponível em: <http://www.window.state.tx.us/specialrpt/energy/renewable/municipal.php> acesso em 8 de jan de 2013

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 093/94: Determinação da Densidade Real dos Grãos. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134/2010-ME: Módulo de Resiliência. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 139/2010-ES: Sub-Base Estabilizada Granulometricamente. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 141/2010-ES: Base Estabilizada Granulometricamente. Rio de Janeiro, 2010.

FARIA, E. O Transporte Rodoviário no Brasil. Disponível em: <http://www.transitocomvida.ufrj.br/TransporteRodoviarioNoBrasil.asp> Acesso em 07 jan de 2013

FIGUEIREDO, C. F. M. L.; ALENDOURO, M. S. J.G.; MONTEIRO, R.C.C.; FERRO, M. C.; FERNANDES, M. H. V. Reciclagem de resíduos sólidos urbanos incinerados por vitroceraização. In: Jornadas Politecnicas de Engenharia, 2, 2002, Setúbal. Anais.

EUROSTAT - GABINETE DE ESTATISTICAS DA UNIÃO EUROPÉIA. Estatísticas de Resíduos. Disponível em: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Waste_statistics/pt. Acesso em 07 jan de 2013

FONTES, C. M. A. Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2008.

FRANCO, F. A. C. P., Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2007

HARREN, R., GOLDSTEIN, N., THEMELIS, N.J., 2010. The state of Garbage in America. BioCycle 2010.

HEIGER, D. N., High Performance Capillary Electrophoresis, Hewlett Packard Company, Publication Number 12-5091-6199E, 1997.

LAPA, N. Incorporação de Cinzas de Fundo em Novos Materiais para a Construção Civil. IN: Revista Lusófona de Arquitectura e Educação, Edições Universitárias Lusófonas, Lisboa, 2007.

LIMA, V. E. Eletroseleção Aplicada à Remediação de Solos Contaminados com Derivados da Indústria de Petróleo. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

LOPES, L. S. E. Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011.

MARQUES, G. L. O. TRN 032 Pavimentação: Notas de Aula da disciplina de Pavimentação. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2007.

MEDINA, J., (1987) – Apostila de estabilização de solos – COPPE/UFRJ.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., Apostila de estabilização de solos. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos. 2ª Edição. Editora UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil. 2005

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A. Estágio atual da incineração no Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E LIMPEZA PÚBLICA, 7., 2000, Curitiba. [Anais eletrônicos...] Curitiba: ABLP, 2000. Disponível em: <<http://www.luftech.com.br/arquivos/art07.htm>> Acesso em: 26 out. 2012.

MIRANDA, L. P.. Análise do Comportamento Mecânico de Pavimento Reforçado com Geossintético sob Carregamento Cíclico em Modelo Físico de Verdadeira Grandeza. Início: 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2013.

NEVES, C. M. M. ; FARIA, O. B. ; ROTONDARO, R. ; SALAS, P. C. ; HOFFMANN, 2009. Seleção de Solos e Métodos de Controle em Construção com Terra – Práticas de Campo. Rede Ibero-americana PROTERRA. Disponível em <http://www.redproterra.org>. Acessado em 22 de maio de 2011.

NOGAMI, J.S., VILLIBOR, D.F. Caracterização e Classificação Gerais de Solos para Pavimentação: Limitações do Método Tradicional, Apresentação de uma Nova Sistemática. In: 15ª Reunião Anual de Pavimentação, pp. 01-38, Belo Horizonte, MG, Agosto, 1980.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F., Pavimentos de Baixo Custo com Solos Lateríticos, Editora Villibor, São Paulo. 1995.

PESSOA, F. H. C. Análise dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário. 151 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

PINTO, A.R.A.G., 2008. Dissertação: Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2008.

PRIGOL, A.C. Caracterização De Agregado Miúdo de Jazida da Região de São Luiz do Purunã em Substituição ao Agregado Miúdo Natural Utilizado em uma Empresa de Concreto Dosado em Central. Trabalho de Conclusão de Curso de de Tecnologia em Concreto. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PSOMOPOULOS, C.S; BOURKA, A.; THEMELIS, N.J. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management* 29, 2009, 1718–1724

REIS-BARROS, J.; LOPES, M.G. Escórias de RSU: Caracterização Mecânica para Fins Rodoviários. CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 10, Lisboa, Portugal, 2006 – “Geotecnia multidisciplinar: ambiente/sísmica”. [S.l.] : Sociedade de Portuguesa de Geotecnia, 2006. Vol. 3, p. 753-763.

REIS-BARROS, J., LOPES, M. G., “Estudo da Utilização de Escórias de R.S.U. na Construção de Pavimentos”, Conferência Científica e Tecnológica em Engenharia, 6 a 10 de Maio de 2002.

ROSENTHAL, E. Europe Finds Clean Energy in Trash, but U.S. Lags. *New York Times*, 2010. Disponível em: <http://www.nytimes.com/2010/04/13/science/earth/13trash.html>
Acesso em 7 de março de 2013

SANDRONI, S., CONSOLI, N.C. Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com Dois Solos Díficeis: Os Extremamente Moles e os Expansivos. COBRAMSEG 2010. Anais. 2010.

SANTOS, G.G.D. Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: O Caso da Incineração e da Disposição em Aterros. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SANTOS, L. C. A questão do lixo urbano e a geografia. In: Seminário de Pós-Graduação em Geografia da UNESP-Rio Claro, 8, 2007, Rio Claro. p.1016-1017.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B., “Estabilização dos solos com cal e betume”. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, Santos, Abril, 1995.

SANTOS, M. N. Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra. Relatório Final de Iniciação Científica. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.

SERRA, T. O Desafio da Aplicação da Diretiva IED. In: Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos, 7, 2011, Porto. Disponível em:

<http://www.isep.ipp.pt/7jtir/uploads/25thOctoberPresentations/1.3Tomas%20Serra.pdf>
Acesso em 07 jan 2013

SILVA, C. C. Comportamento de Solos Siltosos quando Reforçados com Fibras e Melhorados com Aditivos Químicos e Orgânicos. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SOLIZ, V. V. P. Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SPECHT, L. P. Comportamento de misturas Solo-cimento-fibras submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), CPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 2000.

UBALDO, M. O.; MOTTA, L. M. G.; FRITZEN, M. A. Estabilização de Solos para Pavimentação com Uso de Cinza Volante de RSU. COBRAMSEG 2012. Anais. 2012

UE. DIRECTIVA 94/67/CE do Conselho de 16 de Dezembro de 1994 relativa à incineração de resíduos perigosos.

UE, 2000. Directiva 2000/76/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de Dezembro de 2000, relativa à incineração de resíduos.

USINAVERDE S.A. Disponível em: <<http://www.usinaverde.com.br>>. Acesso em: 30 de Outubro de 2012.

VAN KOTE, G. L'incinération des déchets, nouvelle source d'énergie en Europe. Le Monde, 12 abr 2012. Disponível em:

http://www.lemonde.fr/planete/article/2012/04/12/en-europe-l-incineration-des-dechets-devient-source-d-energie_1684597_3244.html

VENDRUSCOLO, M. A. Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais. 224 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

VIZCARRA, G.O.C. Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

WTERT. Quem Somos. Disponível em: <http://www.wtert.com.br/home2010/quem.php>
Acesso em 8 de jan de 2013 Anexo A

Anexo A

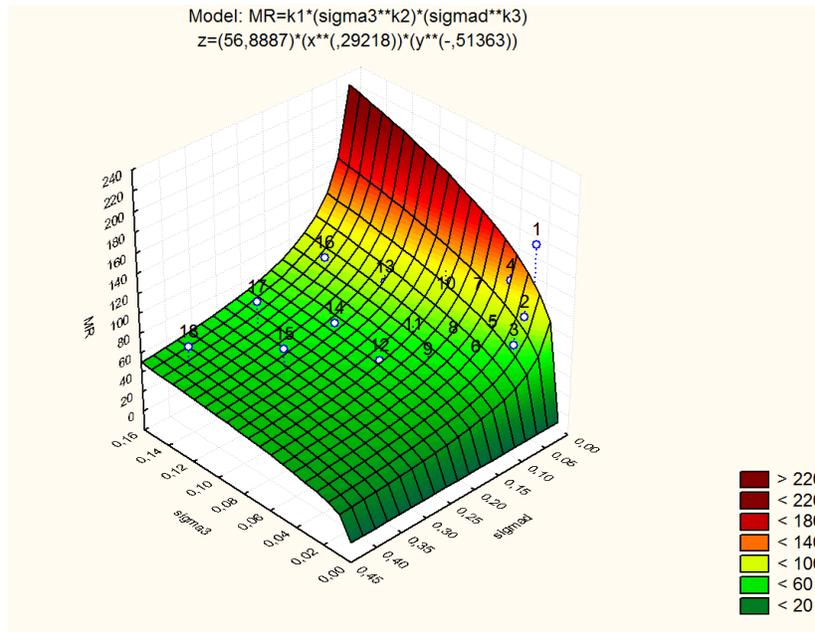


Figura 1 - Gráfico 3D do Modelo Composto do Módulo Resiliente do solo puro deste trabalho

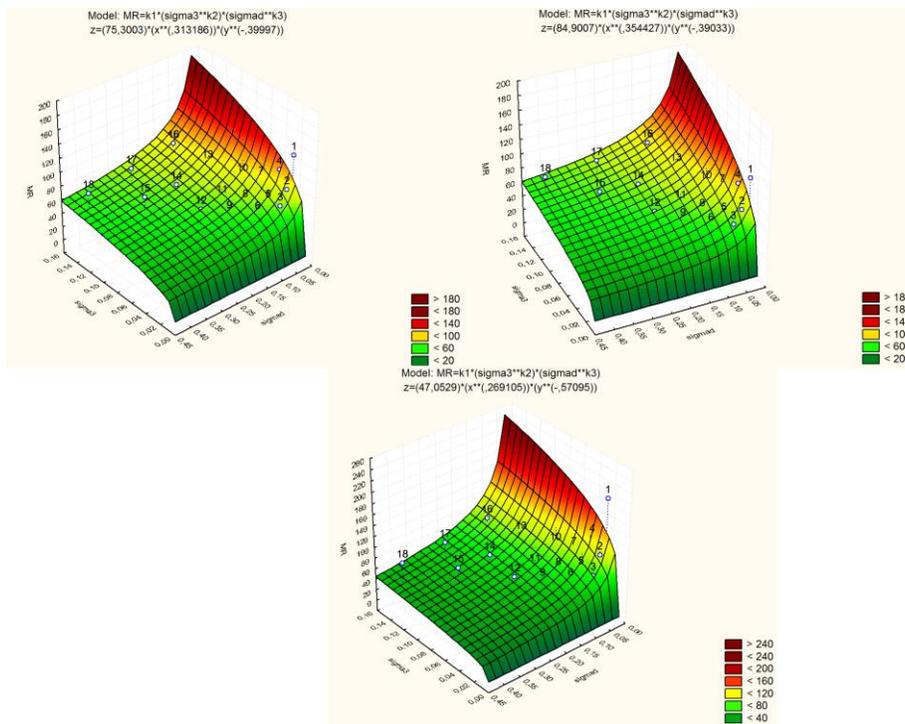


Figura 2 - Gráfico 3D do Modelo Composto do Módulo Resiliente das misturas S80/CF20 deste trabalho

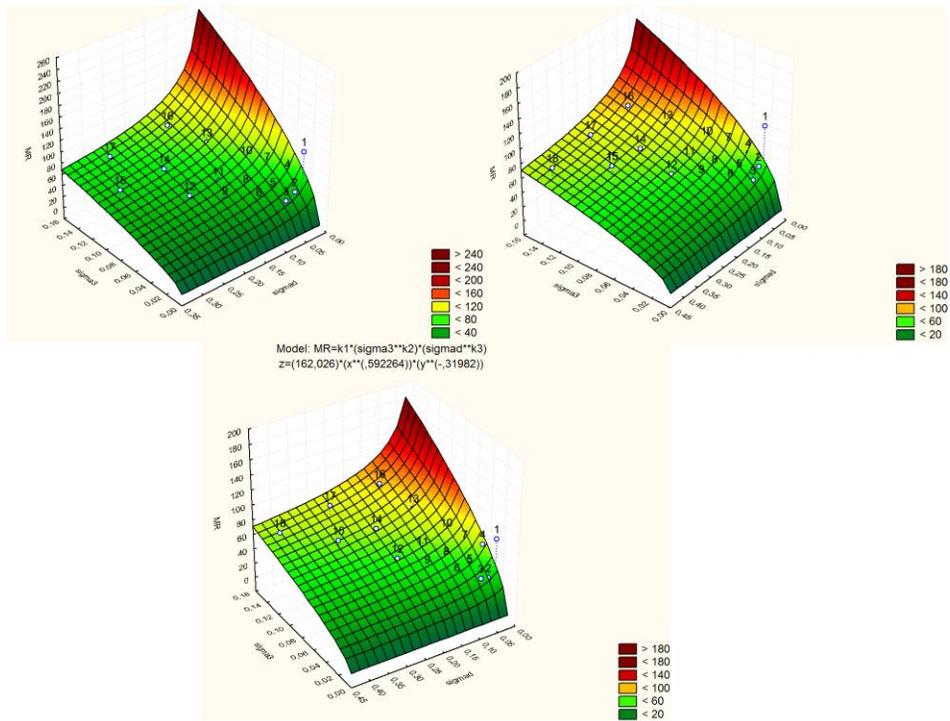


Figura 3 - Gráfico 3D do Modelo Composto do Módulo Resiliente das misturas S60/CF40 deste trabalho

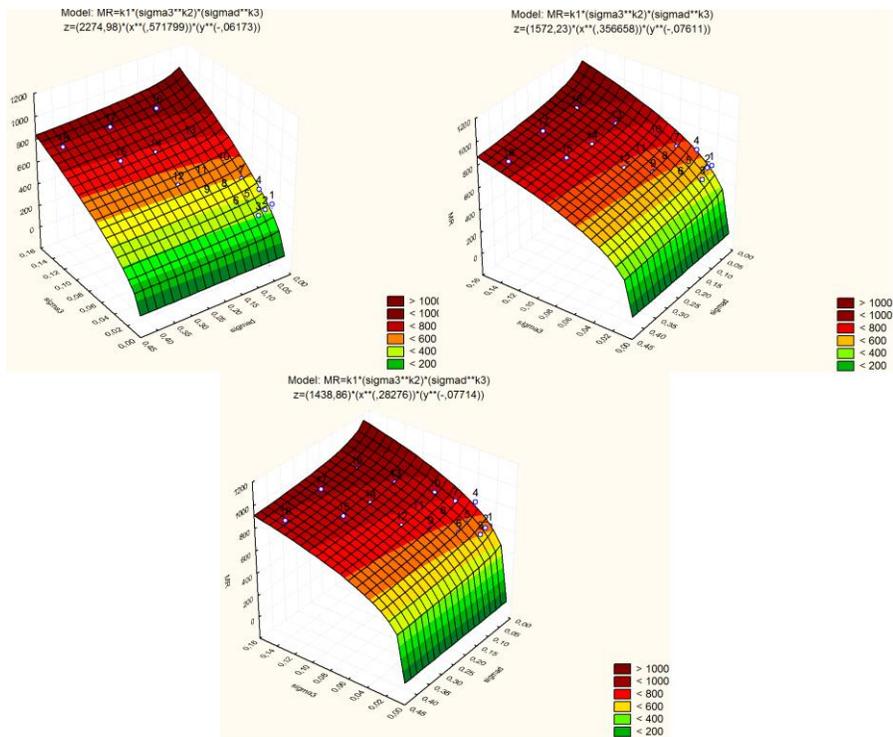


Figura 4 - Gráfico 3D do Modelo Composto do Módulo Resiliente das misturas S77/CF20/C3 com 34 dias de cura

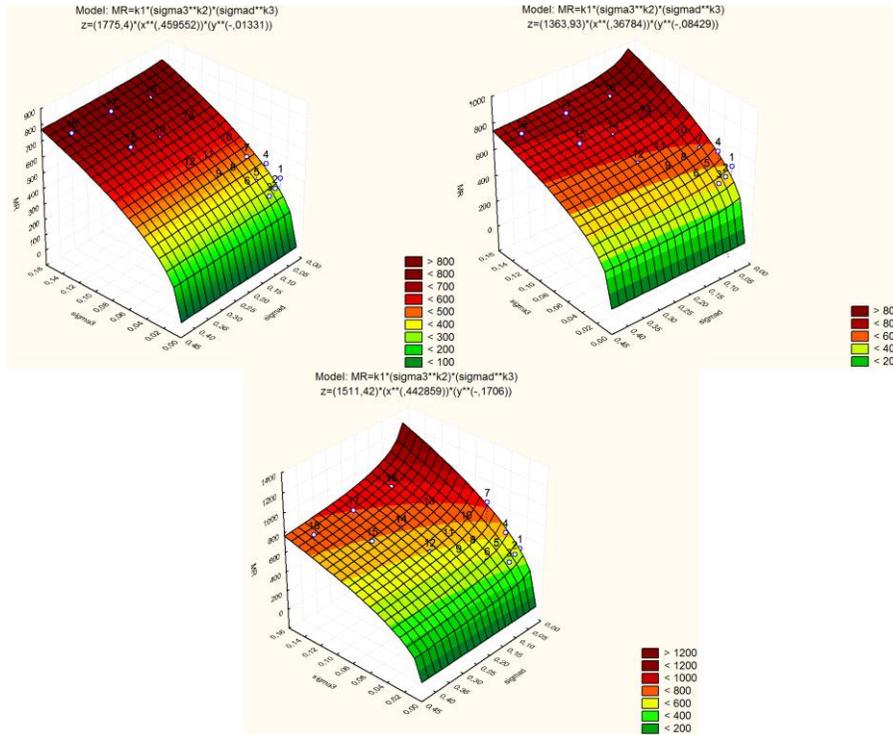


Figura 5 - Gráfico 3D do Modelo Composto do Módulo Resiliente das misturas S77/CF20/C3 com 61 dias de cura

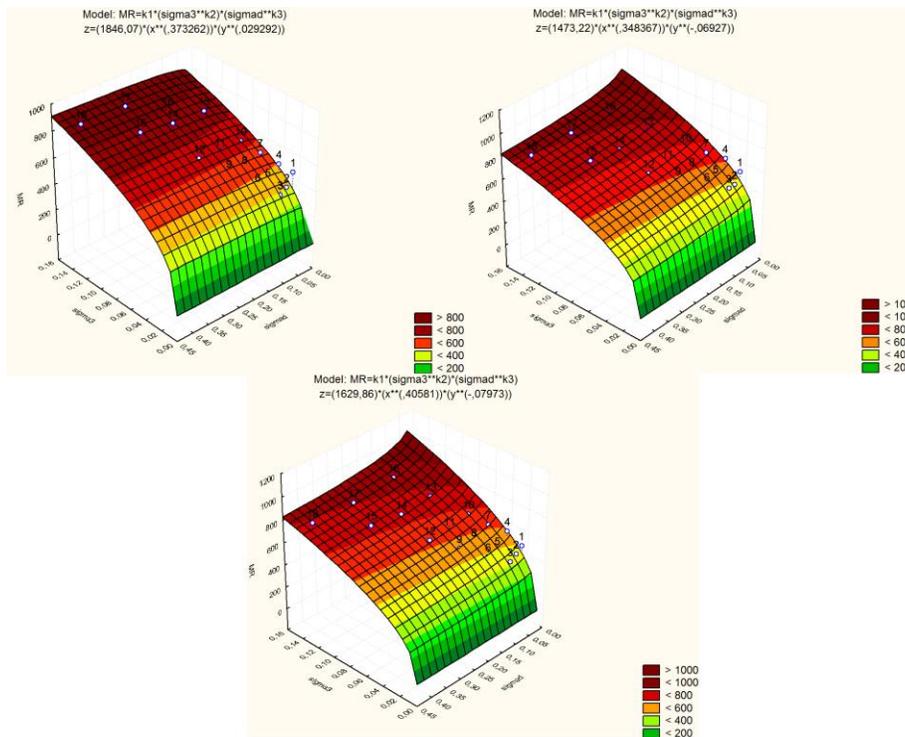


Figura 6 - Gráfico 3D do Modelo Composto do Módulo Resiliente das misturas S77/CF20/C3 com 90 dias de cura

Anexo B

- i) S77/CF20/C3 (34 dias de cura) na camada de base

SisPav 2009

v. 12/09/09

Relatório Técnico **Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos**

O programa faz parte da Tese de Doutorado desenvolvida por:

Filipe Augusto Cinque de Proença Franco

email: filipefacpf@yahoo.com.br

Dimensionamento

Seção do pavimento dimensionada com 101.58% de dano relativo a:

Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)

Nível de confiabilidade de 85%

Vida de serviço estimada em 9.8 Anos

Considerações:

Dano relativo à deflexão na superfície:

Não Avaliado

Dano relativo à tensão admissível no topo do subleito:

Avaliado

Modelos:

Fadiga de Misturas Asfálticas

- Fonte: Franco (2007)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 10000.00
- Coeficiente de Regressão (k1): 1.904e-6
- Coeficiente de Regressão (k2): -2.821
- Coeficiente de Regressão (k3): -0.740
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas de solo-cimento

- Fonte: Ceratti (1991)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Equação do modelo (1 ou 2): 2
- Coeficiente de Regressão (a): 125.63
- Coeficiente de Regressão (b): -14.92
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas tratadas com cimento

- Fonte: Trichês, G. (1994)

- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (a): 14.306
- Coeficiente de Regressão (b): -15.753
- Erro padrão (%): 40

Deflexões admissíveis para determinada vida de Fadiga

- Fonte: Preussler, E.S. (1993)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 100.00
- Erro padrão (%): 40

Deformação permanente de Misturas Asfálticas

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.300
- Coeficiente de Regressão (a): 0.700

Deformação permanente de Materiais Granulares

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos Lateríticos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos finos, siltosos ou argilosos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.500
- Coeficiente de Regressão (a): 0.800

Fatores Climáticos Regionais

Local: **Rio de Janeiro**
 Mês de Abertura do Tráfego: Janeiro
 Temperatura Média Anual do Ar: 23.733°C

Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMMA (°C)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 26.200 | 26.500 | 26.000 | 24.500 | 23.000 | 21.500 | 21.300 | 21.800 | 21.800 | 22.800 | 24.200 | 25.200 |

Estrutura do Pavimento

| | Material | Espessura (m) | Coef Poisson | Módulo (MPa) | Parâmetros |
|---|------------------------------------|---------------|--------------|---|--|
| 1 | Mistura asfáltica | 0.075 | 0.337 | mod = 3 k1 = 4193.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Tipo de CAP = CAP 50/70 Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm = 60.0 Ao (visc x T) = 11.123 VTSO (visc x T) = -3.713 Volume de vazios (%) = 4.5 Teor de asfalto (%) = 6.0 RBV (%) = 73.5 Faixa Granulométrica (DNIT) = Faixa B % passando #3/4 = 90.0 % passando #3/8 = 62.5 % passando #4 = 44.0 % passando #200 = 5.5 |
| 2 | Material granular | 0.120 | 0.350 | mod = 7 k1 = 1762.020 k2 = 0.404 k3 = -0.072 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | |
| 3 | Solos finos, siltosos ou argilosos | 0.000 | 0.400 | mod = 3 k1 = 52.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Classificação (DNIT) = Tipo III CBR (%) = 3 % Silte na fração fina #200 = 80.0 |

Dados do Tráfego

| | |
|------------------------------------|--------|
| Variação lateral do tráfego: | 0.30m |
| % de veículos na faixa de tráfego: | 100% |
| Alinhamento crítico: | 0.00m |
| Distância média entre rodas (SX): | 0.324m |
| Distância média entre eixos (SY): | 1.200m |

Distribuição anual do tráfego (%)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 |

Tráfego previsto

| | Tipo | Rodas | Volume | Taxa | Peso (kgf) | Pressão (MPa) |
|---|--------------------------------|-------|--------|-------|------------|---------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 2 | 100000 | 0.000 | 8200.00 | 0.552 |

Resumo dos danos

| | Tipo | Deflexão Máxima | Tensão Admissível no SL | Fadiga Revestim Betum X | Fadiga Revestim Betum Y | Fadiga Camada Cimentada X | Fadiga Camada Cimentada Y |
|---|--------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.00 | 58.91 | 17.31 | 101.58 | 0.00 | 0.00 |
| | Totais acumulados (%) | 0.00 | 58.91 | 17.31 | 101.58 | 0.00 | 0.00 |

Estimativa de deformação permanente

Deformação permanente acumulada estimada = 0.559cm
 Abaixo do limite aceitável de 1.25cm

Deformação permanente detalhada por eixo e por camada do pavimento (cm)

| | Eixo Tipo | Cam 1 | Cam 2 | Cam 3 | Total Eixo |
|---|--------------------------------|-------|-------|-------|------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.009 | 0.002 | 0.547 | 0.559 |
| | Totais acumulados | 0.009 | 0.002 | 0.547 | 0.559 |

Bacias de deflexão para controle no campo

Viga Benkelman (VBK)

Raio do Carregamento = 0.108m

Pressão do Carregamento = 0.560MPa

Falling Weight Deflectometer (FWD)

Raio da placa do carregamento = 0.150m

Carga aplicada na placa = 4100.00kg

Deflexões em 0.01mm

| Equip | Sensor 1 0.000m | Sensor 2 0.200m | Sensor 3 0.300m | Sensor 4 0.450m | Sensor 5 0.600m | Sensor 6 0.900m | Sensor 7 1.200m | Sensor 8 1.500m |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| VBK | 73.042 | 63.008 | 55.481 | 45.240 | 36.877 | 25.246 | 18.376 | 14.260 |
| FWD | 80.923 | 67.058 | 57.913 | 46.628 | 37.815 | 25.769 | 18.677 | 14.424 |

- ii) S77/CF20/C3 (61 dias de cura) na camada de base

SisPav 2009

v. 12/09/09

Relatório Técnico Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

O programa faz parte da Tese de Doutorado desenvolvida por:

Filipe Augusto Cinque de Proença Franco

email: filipefacpf@yahoo.com.br

Dimensionamento

Seção do pavimento dimensionada com 98.37% de dano relativo a:

Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)

Nível de confiabilidade de 85%

Vida de serviço estimada em 10.2 Anos

Considerações:

Dano relativo à deflexão na superfície:

Não Avaliado

Dano relativo à tensão admissível no topo do subleito:

Avaliado

Modelos:

Fadiga de Misturas Asfálticas

- Fonte: Franco (2007)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 10000.00
- Coeficiente de Regressão (k1): 1.904e-6
- Coeficiente de Regressão (k2): -2.821
- Coeficiente de Regressão (k3): -0.740
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas de solo-cimento

- Fonte: Ceratti (1991)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Equação do modelo (1 ou 2): 2
- Coeficiente de Regressão (a): 125.63
- Coeficiente de Regressão (b): -14.92
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas tratadas com cimento

- Fonte: Trichês, G. (1994)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (a): 14.306
- Coeficiente de Regressão (b): -15.753

- Erro padrão (%): 40

Deflexões admissíveis para determinada vida de Fadiga

- Fonte: Preussler, E.S. (1993)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 100.00
- Erro padrão (%): 40

Deformação permanente de Misturas Asfálticas

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.300
- Coeficiente de Regressão (a): 0.700

Deformação permanente de Materiais Granulares

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos Lateríticos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos finos, siltosos ou argilosos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.500
- Coeficiente de Regressão (a): 0.800

Fatores Climáticos Regionais

Local: **Rio de Janeiro**
Mês de Abertura do Tráfego: Janeiro
Temperatura Média Anual do Ar: 23.733°C

Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMA (°C)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 26.200 | 26.500 | 26.000 | 24.500 | 23.000 | 21.500 | 21.300 | 21.800 | 21.800 | 22.800 | 24.200 | 25.200 |

Estrutura do Pavimento

| | Material | Espessura (m) | Coef Poisson | Módulo (MPa) | Parâmetros |
|---|------------------------------------|---------------|--------------|---|--|
| 1 | Mistura asfáltica | 0.075 | 0.337 | mod = 3 k1 = 4193.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Tipo de CAP = CAP 50/70 Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm = 60.0 Ao (visc x T) = 11.123 VTSO (visc x T) = -3.713 Volume de vazios (%) = 4.5 Teor de asfalto (%) = 6.0 RBV (%) = 73.5 Faixa Granulométrica (DNIT) = Faixa B % passando #3/4 = 90.0 % passando #3/8 = 62.5 % passando #4 = 44.0 % passando #200 = 5.5 |
| 2 | Material granular | 0.180 | 0.350 | mod = 7 k1 = 1550.000 k2 = 0.423 k3 = -0.089 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | |
| 3 | Solos finos, siltosos ou argilosos | 0.000 | 0.400 | mod = 3 k1 = 52.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Classificação (DNIT) = Tipo III CBR (%) = 3 % Silte na fração fina #200 = 80.0 |

Dados do Tráfego

| | |
|------------------------------------|--------|
| Variação lateral do tráfego: | 0.30m |
| % de veículos na faixa de tráfego: | 100% |
| Alinhamento crítico: | 0.00m |
| Distância média entre rodas (SX): | 0.324m |
| Distância média entre eixos (SY): | 1.200m |

Distribuição anual do tráfego (%)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 |

Tráfego previsto

| | Tipo | Rodas | Volume | Taxa | Peso (kgf) | Pressão (MPa) |
|---|--------------------------------|-------|--------|-------|------------|---------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 2 | 100000 | 0.000 | 8200.00 | 0.552 |

Resumo dos danos

| | Tipo | Deflexão Máxima | Tensão Admissível no SL | Fadiga Revestim Betum X | Fadiga Revestim Betum Y | Fadiga Camada Cimentada X | Fadiga Camada Cimentada Y |
|---|--------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.00 | 0.91 | 16.31 | 98.37 | 0.00 | 0.00 |
| | Totais acumulados (%) | 0.00 | 0.91 | 16.31 | 98.37 | 0.00 | 0.00 |

Estimativa de deformação permanente

Deformação permanente acumulada estimada = 0.480cm
 Abaixo do limite aceitável de 1.25cm

Deformação permanente detalhada por eixo e por camada do pavimento (cm)

| | Eixo Tipo | Cam 1 | Cam 2 | Cam 3 | Total Eixo |
|---|--------------------------------|-------|-------|-------|------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.010 | 0.004 | 0.466 | 0.480 |
| | Totais acumulados | 0.010 | 0.004 | 0.466 | 0.480 |

Bacias de deflexão para controle no campo

Viga Benkelman (VBK)

Raio do Carregamento = 0.108m

Pressão do Carregamento = 0.560MPa

Falling Weight Deflectometer (FWD)

Raio da placa do carregamento = 0.150m

Carga aplicada na placa = 4100.00kg

Deflexões em 0.01mm

| Equip | Sensor 1 0.000m | Sensor 2 0.200m | Sensor 3 0.300m | Sensor 4 0.450m | Sensor 5 0.600m | Sensor 6 0.900m | Sensor 7 1.200m | Sensor 8 1.500m |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| VBK | 66.993 | 57.589 | 50.949 | 42.265 | 35.228 | 25.109 | 18.703 | 14.604 |
| FWD | 76.615 | 62.496 | 53.714 | 43.613 | 36.004 | 25.461 | 18.902 | 14.725 |

iii) S77/CF20/C3 (90 dias de cura) na camada de base

SisPav 2009

v. 12/09/09

Relatório Técnico Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

O programa faz parte da Tese de Doutorado desenvolvida por:

Filipe Augusto Cinque de Proença Franco

email: filipefacpf@yahoo.com.br

Dimensionamento

Seção do pavimento dimensionada com 101.25% de dano relativo a:

Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)

Nível de confiabilidade de 85%

Vida de serviço estimada em 9.9 Anos

Considerações:

Dano relativo à deflexão na superfície:

Não Avaliado

Dano relativo à tensão admissível no topo do subleito:

Avaliado

Modelos:

Fadiga de Misturas Asfálticas

- Fonte: Franco (2007)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 10000.00
- Coeficiente de Regressão (k1): 1.904e-6
- Coeficiente de Regressão (k2): -2.821
- Coeficiente de Regressão (k3): -0.740
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas de solo-cimento

- Fonte: Ceratti (1991)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Equação do modelo (1 ou 2): 2
- Coeficiente de Regressão (a): 125.63
- Coeficiente de Regressão (b): -14.92
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas tratadas com cimento

- Fonte: Trichês, G. (1994)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (a): 14.306

- Coeficiente de Regressão (b): -15.753
- Erro padrão (%): 40

Deflexões admissíveis para determinada vida de Fadiga

- Fonte: Preussler, E.S. (1993)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 100.00
- Erro padrão (%): 40

Deformação permanente de Misturas Asfálticas

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.300
- Coeficiente de Regressão (a): 0.700

Deformação permanente de Materiais Granulares

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos Lateríticos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos finos, siltosos ou argilosos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.500
- Coeficiente de Regressão (a): 0.800

Fatores Climáticos Regionais

Local: **Rio de Janeiro**
 Mês de Abertura do Tráfego: Janeiro
 Temperatura Média Anual do Ar: 23.895°C

Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMMA (°C)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 26.200 | 26.500 | 26.000 | 24.500 | 23.000 | 21.500 | 21.300 | 21.800 | 21.800 | 22.800 | 24.200 | 25.200 |

Estrutura do Pavimento

| | Material | Espessura (m) | Coef Poisson | Módulo (MPa) | Parâmetros |
|---|------------------------------------|---------------|--------------|---|--|
| 1 | Mistura asfáltica | 0.075 | 0.337 | mod = 3 k1 = 4193.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Tipo de CAP = CAP 50/70 Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm = 60.0 Ao (visc x T) = 11.123 VTSO (visc x T) = -3.713 Volume de vazios (%) = 4.5 Teor de asfalto (%) = 6.0 RBV (%) = 73.5 Faixa Granulométrica (DNIT) = Faixa B % passando #3/4 = 90.0 % passando #3/8 = 62.5 % passando #4 = 44.0 % passando #200 = 5.5 |
| 2 | Material granular | 0.140 | 0.350 | mod = 7 k1 = 1649.720 k2 = 0.376 k3 = -0.040 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | |
| 3 | Solos finos, siltosos ou argilosos | 0.000 | 0.400 | mod = 3 k1 = 52.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Classificação (DNIT) = Tipo III CBR (%) = 3 % Silte na fração fina #200 = 80.0 |

Dados do Tráfego

| | |
|------------------------------------|--------|
| Variação lateral do tráfego: | 0.30m |
| % de veículos na faixa de tráfego: | 100% |
| Alinhamento crítico: | 0.00m |
| Distância média entre rodas (SX): | 0.324m |
| Distância média entre eixos (SY): | 1.200m |

Distribuição anual do tráfego (%)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 |

Tráfego previsto

| | Tipo | Rodas | Volume | Taxa | Peso (kgf) | Pressão (MPa) |
|---|--------------------------------|-------|--------|-------|------------|---------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 2 | 100000 | 0.000 | 8200.00 | 0.552 |

Resumo dos danos

| | Tipo | Deflexão Máxima | Tensão Admissível no SL | Fadiga Revestim Betum X | Fadiga Revestim Betum Y | Fadiga Camada Cimentada X | Fadiga Camada Cimentada Y |
|---|--------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.00 | 16.19 | 17.04 | 101.25 | 0.00 | 0.00 |
| | Totais acumulados (%) | 0.00 | 16.19 | 17.04 | 101.25 | 0.00 | 0.00 |

Estimativa de deformação permanente

Deformação permanente acumulada estimada = 0.536cm
 Abaixo do limite aceitável de 1.25cm

Deformação permanente detalhada por eixo e por camada do pavimento (cm)

| | Eixo Tipo | Cam 1 | Cam 2 | Cam 3 | Total Eixo |
|---|--------------------------------|-------|-------|-------|------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.010 | 0.003 | 0.524 | 0.536 |
| | Totais acumulados | 0.010 | 0.003 | 0.524 | 0.536 |

Bacias de deflexão para controle no campo

Viga Benkelman (VBK)

Raio do Carregamento = 0.108m

Pressão do Carregamento = 0.560MPa

Falling Weight Deflectometer (FWD)

Raio da placa do carregamento = 0.150m

Carga aplicada na placa = 4100.00kg

Deflexões em 0.01mm

| Equip | Sensor 1 0.000m | Sensor 2 0.200m | Sensor 3 0.300m | Sensor 4 0.450m | Sensor 5 0.600m | Sensor 6 0.900m | Sensor 7 1.200m | Sensor 8 1.500m |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| VBK | 71.972 | 61.863 | 54.435 | 44.490 | 36.433 | 25.183 | 18.438 | 14.332 |
| FWD | 81.666 | 66.999 | 57.485 | 46.088 | 37.389 | 25.613 | 18.661 | 14.453 |

- iv) S77/CF20/C3 (34 dias de cura) na camada de base e camada de S60/CF40 como reforço de subleito

SisPav 2009

v. 12/09/09

Relatório Técnico Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

O programa faz parte da Tese de Doutorado desenvolvida por:

Filipe Augusto Cinque de Proença Franco

email: filipefacpf@yahoo.com.br

Dimensionamento

Seção do pavimento dimensionada com 99.99% de dano relativo a:
Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)
Nível de confiabilidade de 85%
Vida de serviço estimada em 10.0 Anos

Considerações:

| | |
|--|--------------|
| Dano relativo à deflexão na superfície: | Não Avaliado |
| Dano relativo à tensão admissível no topo do subleito: | Avaliado |

Modelos:

Fadiga de Misturas Asfálticas

- Fonte: Franco (2007)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 10000.00
- Coeficiente de Regressão (k1): 1.904e-6
- Coeficiente de Regressão (k2): -2.821
- Coeficiente de Regressão (k3): -0.740
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas de solo-cimento

- Fonte: Ceratti (1991)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Equação do modelo (1 ou 2): 2
- Coeficiente de Regressão (a): 125.63
- Coeficiente de Regressão (b): -14.92
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas tratadas com cimento

- Fonte: Trichês, G. (1994)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (a): 14.306
- Coeficiente de Regressão (b): -15.753

- Erro padrão (%): 40

Deflexões admissíveis para determinada vida de Fadiga

- Fonte: Preussler, E.S. (1993)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 100.00
- Erro padrão (%): 40

Deformação permanente de Misturas Asfálticas

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.300
- Coeficiente de Regressão (a): 0.700

Deformação permanente de Materiais Granulares

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos Lateríticos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos finos, siltosos ou argilosos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.500
- Coeficiente de Regressão (a): 0.800

Fatores Climáticos Regionais

Local: **Rio de Janeiro**
Mês de Abertura do Tráfego: Janeiro
Temperatura Média Anual do Ar: 23.895°C

Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMMA (°C)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 26.200 | 26.500 | 26.000 | 24.500 | 23.000 | 21.500 | 21.300 | 21.800 | 21.800 | 22.800 | 24.200 | 25.200 |

Estrutura do Pavimento

| | Material | Espessura (m) | Coef Poisson | Módulo (MPa) | Parâmetros |
|---|------------------------------------|---------------|--------------|---|--|
| 1 | Mistura asfáltica | 0.075 | 0.337 | mod = 3 k1 = 4193.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Tipo de CAP = CAP 50/70 Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm = 60.0 Ao (visc x T) = 11.123 VTSO (visc x T) = -3.713 Volume de vazios (%) = 4.5 Teor de asfalto (%) = 6.0 RBV (%) = 73.5 Faixa Granulométrica (DNIT) = Faixa B % passando #3/4 = 90.0 % passando #3/8 = 62.5 % passando #4 = 44.0 % passando #200 = 5.5 |
| 2 | Material granular | 0.130 | 0.350 | mod = 7 k1 = 1762.020 k2 = 0.404 k3 = -0.072 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | |
| 3 | Material granular | 0.400 | 0.350 | mod = 7 k1 = 145.870 k2 = 0.574 k3 = -0.358 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | |
| 4 | Solos finos, siltosos ou argilosos | 0.000 | 0.400 | mod = 3 k1 = 52.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Classificação (DNIT) = Tipo III CBR (%) = 3 % Silte na fração fina #200 = 80.0 |

Dados do Tráfego

| | |
|------------------------------------|--------|
| Varição lateral do tráfego: | 0.30m |
| % de veículos na faixa de tráfego: | 100% |
| Alinhamento crítico: | 0.00m |
| Distância média entre rodas (SX): | 0.324m |
| Distância média entre eixos (SY): | 1.200m |

Distribuição anual do tráfego (%)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 |

Tráfego previsto

| | Tipo | Rodas | Volume | Taxa | Peso (kgf) | Pressão (MPa) |
|---|--------------------------------|-------|--------|-------|------------|---------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 2 | 100000 | 0.000 | 8200.00 | 0.552 |

Resumo dos danos

| | Tipo | Deflexão Máxima | Tensão Admissível no SL | Fadiga Revestim Betum X | Fadiga Revestim Betum Y | Fadiga Camada Cimentada X | Fadiga Camada Cimentada Y |
|---|--------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.00 | 0.00 | 16.70 | 99.99 | 0.00 | 0.00 |
| | Totais acumulados (%) | 0.00 | 0.00 | 16.70 | 99.99 | 0.00 | 0.00 |

Estimativa de deformação permanente

Deformação permanente acumulada estimada = 0.466cm
 Abaixo do limite aceitável de 1.25cm

Deformação permanente detalhada por eixo e por camada do pavimento (cm)

| | Eixo Tipo | Cam 1 | Cam 2 | Cam 3 | Cam 4 | Total Eixo |
|---|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.010 | 0.003 | 0.017 | 0.437 | 0.466 |
| | Totais acumulados | 0.010 | 0.003 | 0.017 | 0.437 | 0.466 |

Bacias de deflexão para controle no campo

Viga Benkelman (VBK)

Raio do Carregamento = 0.108m

Pressão do Carregamento = 0.560MPa

Falling Weight Deflectometer (FWD)

Raio da placa do carregamento = 0.150m

Carga aplicada na placa = 4100.00kg

Deflexões em 0.01mm

| Equip | Sensor 1 0.000m | Sensor 2 0.200m | Sensor 3 0.300m | Sensor 4 0.450m | Sensor 5 0.600m | Sensor 6 0.900m | Sensor 7 1.200m | Sensor 8 1.500m |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| VBK | 72.209 | 62.091 | 54.620 | 44.604 | 36.512 | 25.280 | 18.573 | 14.477 |
| FWD | 83.045 | 68.176 | 58.455 | 46.755 | 37.837 | 25.849 | 18.829 | 14.589 |

- v) S77/CF20/C3 (61 dias de cura) na camada de base e camada de S60/CF40 como reforço de subleito

SisPav 2009

v. 12/09/09

Relatório Técnico Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

O programa faz parte da Tese de Doutorado desenvolvida por:

Filipe Augusto Cinque de Proença Franco

email: filipefacpf@yahoo.com.br

Dimensionamento

Seção do pavimento dimensionada com 98.67% de dano relativo a:

Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)

Nível de confiabilidade de 85%

Vida de serviço estimada em 10.1 Anos

Considerações:

Dano relativo à deflexão na superfície:

Não Avaliado

Dano relativo à tensão admissível no topo do subleito:

Avaliado

Modelos:

Fadiga de Misturas Asfálticas

- Fonte: Franco (2007)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 10000.00
- Coeficiente de Regressão (k1): 1.904e-6
- Coeficiente de Regressão (k2): -2.821
- Coeficiente de Regressão (k3): -0.740
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas de solo-cimento

- Fonte: Ceratti (1991)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Equação do modelo (1 ou 2): 2
- Coeficiente de Regressão (a): 125.63
- Coeficiente de Regressão (b): -14.92
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas tratadas com cimento

- Fonte: Trichês, G. (1994)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (a): 14.306

- Coeficiente de Regressão (b): -15.753
- Erro padrão (%): 40

Deflexões admissíveis para determinada vida de Fadiga

- Fonte: Preussler, E.S. (1993)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 100.00
- Erro padrão (%): 40

Deformação permanente de Misturas Asfálticas

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.300
- Coeficiente de Regressão (a): 0.700

Deformação permanente de Materiais Granulares

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos Lateríticos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos finos, siltosos ou argilosos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.500
- Coeficiente de Regressão (a): 0.800

Fatores Climáticos Regionais

Local: **Rio de Janeiro**
 Mês de Abertura do Tráfego: Janeiro
 Temperatura Média Anual do Ar: 23.733°C

Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMMA (°C)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 26.200 | 26.500 | 26.000 | 24.500 | 23.000 | 21.500 | 21.300 | 21.800 | 21.800 | 22.800 | 24.200 | 25.200 |

Estrutura do Pavimento

| | Material | Espessura (m) | Coef Poisson | Módulo (MPa) | Parâmetros |
|---|------------------------------------|---------------|--------------|---|--|
| 1 | Mistura asfáltica | 0.075 | 0.337 | mod = 3 k1 = 4193.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Tipo de CAP = CAP 50/70 Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm = 60.0 Ao (visc x T) = 11.123 VTSO (visc x T) = -3.713 Volume de vazios (%) = 4.5 Teor de asfalto (%) = 6.0 RBV (%) = 73.5 Faixa Granulométrica (DNIT) = Faixa B % passando #3/4 = 90.0 % passando #3/8 = 62.5 % passando #4 = 44.0 % passando #200 = 5.5 |
| 2 | Material granular | 0.180 | 0.350 | mod = 7 k1 = 1550.000 k2 = 0.423 k3 = -0.089 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | |
| 3 | Material granular | 0.200 | 0.350 | mod = 7 k1 = 145.870 k2 = 0.574 k3 = -0.358 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | |
| 4 | Solos finos, siltosos ou argilosos | 0.000 | 0.400 | mod = 3 k1 = 52.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Classificação (DNIT) = Tipo III CBR (%) = 3 % Silte na fração fina #200 = 80.0 |

Dados do Tráfego

Variação lateral do tráfego: 0.30m
 % de veículos na faixa de tráfego: 100%
 Alinhamento crítico: 0.00m
 Distância média entre rodas (SX): 0.324m
 Distância média entre eixos (SY): 1.200m

Distribuição anual do tráfego (%)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 |

Tráfego previsto

| | Tipo | Rodas | Volume | Taxa | Peso (kgf) | Pressão (MPa) |
|---|--------------------------------|-------|--------|-------|------------|---------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 2 | 100000 | 0.000 | 8200.00 | 0.552 |

Resumo dos danos

| | Tipo | Deflexão Máxima | Tensão Admissível no SL | Fadiga Revestim Betum X | Fadiga Revestim Betum Y | Fadiga Camada Cimentada X | Fadiga Camada Cimentada Y |
|---|--------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.00 | 0.00 | 16.31 | 98.67 | 0.00 | 0.00 |
| | Totais acumulados (%) | 0.00 | 0.00 | 16.31 | 98.67 | 0.00 | 0.00 |

Estimativa de deformação permanente

Deformação permanente acumulada estimada = 0.530cm
 Abaixo do limite aceitável de 1.25cm

Deformação permanente detalhada por eixo e por camada do pavimento (cm)

| | Eixo Tipo | Cam 1 | Cam 2 | Cam 3 | Cam 4 | Total Eixo |
|---|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.010 | 0.004 | 0.009 | 0.507 | 0.530 |
| | Totais acumulados | 0.010 | 0.004 | 0.009 | 0.507 | 0.530 |

Bacias de deflexão para controle no campo

Viga Benkelman (VBK)

Raio do Carregamento = 0.108m

Pressão do Carregamento = 0.560MPa

Falling Weight Deflectometer (FWD)

Raio da placa do carregamento = 0.150m

Carga aplicada na placa = 4100.00kg

Deflexões em 0.01mm

| Equip | Sensor 1 0.000m | Sensor 2 0.200m | Sensor 3 0.300m | Sensor 4 0.450m | Sensor 5 0.600m | Sensor 6 0.900m | Sensor 7 1.200m | Sensor 8 1.500m |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| VBK | 67.195 | 57.782 | 51.126 | 42.418 | 35.365 | 25.231 | 18.809 | 14.689 |
| FWD | 77.384 | 63.171 | 54.298 | 44.064 | 36.350 | 25.672 | 19.036 | 14.812 |

- iv) S77/CF20/C3 (90 dias de cura) na camada de base e camada de S60/CF40 como reforço de subleito

SisPav 2009

v. 12/09/09

Relatório Técnico Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos

O programa faz parte da Tese de Doutorado desenvolvida por:

Filipe Augusto Cinque de Proença Franco

email: filipecacpf@yahoo.com.br

Dimensionamento

Seção do pavimento dimensionada com 101.45% de dano relativo a:
Fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo Y)
Nível de confiabilidade de 85%
Vida de serviço estimada em 9.9 Anos

Considerações:

| | |
|--|--------------|
| Dano relativo à deflexão na superfície: | Não Avaliado |
| Dano relativo à tensão admissível no topo do subleito: | Avaliado |

Modelos:

Fadiga de Misturas Asfálticas

- Fonte: Franco (2007)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 10000.00
- Coeficiente de Regressão (k1): 1.904e-6
- Coeficiente de Regressão (k2): -2.821
- Coeficiente de Regressão (k3): -0.740
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas de solo-cimento

- Fonte: Ceratti (1991)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Equação do modelo (1 ou 2): 2
- Coeficiente de Regressão (a): 125.63
- Coeficiente de Regressão (b): -14.92
- Erro padrão (%): 40

Fadiga de misturas tratadas com cimento

- Fonte: Trichês, G. (1994)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00

- Coeficiente de Regressão (a): 14.306
- Coeficiente de Regressão (b): -15.753
- Erro padrão (%): 40

Deflexões admissíveis para determinada vida de Fadiga

- Fonte: Preussler, E.S. (1993)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 100.00
- Erro padrão (%): 40

Deformação permanente de Misturas Asfálticas

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.300
- Coeficiente de Regressão (a): 0.700

Deformação permanente de Materiais Granulares

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos Lateríticos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.150
- Coeficiente de Regressão (a): 0.950

Deformação permanente de Solos finos, siltosos ou argilosos

- Fonte: UZAN (1982)
- Fator Campo-Laboratório (fcl): 1.00
- Coeficiente de Regressão (μ): 0.500
- Coeficiente de Regressão (a): 0.800

Fatores Climáticos Regionais

Local: **Rio de Janeiro**
 Mês de Abertura do Tráfego: Janeiro
 Temperatura Média Anual do Ar: 23.733°C

Temperaturas Médias Mensais do Ar - TMMA (°C)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 26.200 | 26.500 | 26.000 | 24.500 | 23.000 | 21.500 | 21.300 | 21.800 | 21.800 | 22.800 | 24.200 | 25.200 |

Estrutura do Pavimento

| | Material | Espessura (m) | Coef Poisson | Módulo (MPa) | Parâmetros |
|---|------------------------------------|---------------|--------------|---|--|
| 1 | Mistura asfáltica | 0.075 | 0.337 | mod = 3 k1 = 4193.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Tipo de CAP = CAP 50/70 Penetração 100g 5s 25°C 0,1mm = 60.0 Ao (visc x T) = 11.123 VTSO (visc x T) = -3.713 Volume de vazios (%) = 4.5 Teor de asfalto (%) = 6.0 RBV (%) = 73.5 Faixa Granulométrica (DNIT) = Faixa B % passando #3/4 = 90.0 % passando #3/8 = 62.5 % passando #4 = 44.0 % passando #200 = 5.5 |
| 2 | Material granular | 0.150 | 0.350 | mod = 7 k1 = 1649.720 k2 = 0.376 k3 = -0.040 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | |
| 3 | Material granular | 0.200 | 0.350 | mod = 7 k1 = 145.870 k2 = 0.574 k3 = -0.358 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | |
| 4 | Solos finos, siltosos ou argilosos | 0.000 | 0.400 | mod = 3 k1 = 52.000 k2 = 0.000 k3 = 0.000 k4 = 0.000 k5 = 0.000 | Classificação (DNIT) = Tipo III CBR (%) = 3 % Silte na fração fina #200 = 80.0 |

Dados do Tráfego

Variação lateral do tráfego: 0.30m
 % de veículos na faixa de tráfego: 100%
 Alinhamento crítico: 0.00m
 Distância média entre rodas (SX): 0.324m
 Distância média entre eixos (SY): 1.200m

Distribuição anual do tráfego (%)

| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 | 8.333 |

Tráfego previsto

| | Tipo | Rodas | Volume | Taxa | Peso (kgf) | Pressão (MPa) |
|---|--------------------------------|-------|--------|-------|------------|---------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 2 | 100000 | 0.000 | 8200.00 | 0.552 |

Resumo dos danos

| | Tipo | Deflexão Máxima | Tensão Admissível no SL | Fadiga Revestim Betum X | Fadiga Revestim Betum Y | Fadiga Camada Cimentada X | Fadiga Camada Cimentada Y |
|---|--------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.00 | 0.00 | 16.93 | 101.45 | 0.00 | 0.00 |
| | Totais acumulados (%) | 0.00 | 0.00 | 16.93 | 101.45 | 0.00 | 0.00 |

Estimativa de deformação permanente

Deformação permanente acumulada estimada = 0.584cm
 Abaixo do limite aceitável de 1.25cm

Deformação permanente detalhada por eixo e por camada do pavimento (cm)

| | Eixo Tipo | Cam 1 | Cam 2 | Cam 3 | Cam 4 | Total Eixo |
|---|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------|
| 1 | 5 - Eixo simples de roda dupla | 0.010 | 0.003 | 0.010 | 0.561 | 0.584 |
| | Totais acumulados | 0.010 | 0.003 | 0.010 | 0.561 | 0.584 |

Bacias de deflexão para controle no campo

Viga Benkelman (VBK)

Raio do Carregamento = 0.108m

Pressão do Carregamento = 0.560MPa

Falling Weight Deflectometer (FWD)

Raio da placa do carregamento = 0.150m

Carga aplicada na placa = 4100.00kg

Deflexões em 0.01mm

| Equip | Sensor 1 0.000m | Sensor 2 0.200m | Sensor 3 0.300m | Sensor 4 0.450m | Sensor 5 0.600m | Sensor 6 0.900m | Sensor 7 1.200m | Sensor 8 1.500m |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| VBK | 71.327 | 61.391 | 54.119 | 44.394 | 36.495 | 25.381 | 18.632 | 14.476 |
| FWD | 81.529 | 66.972 | 57.555 | 46.282 | 37.655 | 25.893 | 18.875 | 14.593 |