

3 Programa Experimental

3.1. Considerações Iniciais

O programa experimental do presente trabalho foi dividido em duas etapas principais. A primeira referente ao estudo preliminar, na qual foram definidos os teores de cinzas adotados para as misturas, com base na revisão bibliográfica existente e incluiu a caracterização física e química dos materiais utilizados: cinzas volante e de fundo, solo selecionado e as misturas destes com a cal, com a finalidade de conhecer seus índices físicos.

A segunda fase de ensaios consistiu na análise dos parâmetros de resistência e deformabilidade das misturas, visando verificar a viabilidade destas como bases e sub-bases de pavimentos. Foi realizada uma sequência de ensaios de Módulo de Resiliência e de Deformação Permanente com diferentes tempos de cura, para as misturas em questão. Além destes ensaios mecânicos foi feita a análise ambiental das misturas, englobando ensaios de lixiviação e solubilização.

Após todas estas etapas foi proposto através de um programa computacional, SisPav, (Franco, 2007), o dimensionamento de um pavimento típico, com as misturas estudadas compondo a base do mesmo.

Na Tabela 3.1 estão listados os ensaios realizados e suas quantidades.

São apresentados a seguir os dados e as origens dos materiais utilizados na presente pesquisa, as descrições sumárias dos ensaios realizados e feitas considerações sobre a aplicabilidade dos materiais estudados.

Tabela 3.1 – Descrição e Quantidades dos Ensaio

Etapa	Material	Ensaio	Quantidade*
Caracterização Física	Solo	Massa Específica Real dos Grãos	3
		Análise Granulométrica	1
		Limite de Liquidez	1
		Limite de Plasticidade	1
	Cinza Volante	Umidade Higroscópica	3
		Massa Específica Real dos Grãos	3
		Análise Granulométrica	1
		Limite de Liquidez	1
		Limite de Plasticidade	1
	Cinza de Fundo	Umidade Higroscópica	3
		Massa Específica Real dos Grãos	3
		Análise Granulométrica	1
		Limite de Liquidez	1
	Misturas com e sem cal	Limite de Plasticidade	1
		Umidade Higroscópica	3
		Limite de Liquidez	1
Massa Específica Real dos Grãos		3	
Resistência Mecânica	Solo, Cinzas Fundo e Volantes, Misturas com cal	Curva de Compactação**	1
		Ensaio de Módulo de Resiliência	12
	Misturas com e sem cal	Ensaio de Deformação Permanente	3
Caracterização Química e Ambiental	Misturas com e sem cal e Cinzas Fundo e Volante	Composição Química	1
		Misturas com cal	Teor de Matéria Orgânica
	Cinza de Fundo e Volante	Lixiviação	1
		Solubilização	1

* quantidade de ensaios por material e/ou mistura

** Para cada curva de compactação foram feitos 5 ou 6 pontos.

3.2. Materiais

3.2.1. Solo

A escolha do solo utilizado prendeu-se à facilidade de obtenção e ao fato de a mesma jazida já ter sido utilizada em outros trabalhos no Laboratório de Geotecnia da COPPE. Não há muitas jazidas em operação no município do Rio de Janeiro tendo em vista a grande urbanização existente. Assim, quase fica restrita escolha e por facilidade de acesso e atenção do dono, foi utilizada uma jazida, atualmente desativada, situada na Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro, bairro de Campo Grande.

A área estudada, segundo o mapa de solos do Estado do Rio de Janeiro do DRM-RJ, apresentado em parte na Figura 3.1, é caracterizada pela presença de solos podzólico vermelho-amarelo álico, planossolo álico, além de latossolo vermelho amarelo álico.

Segundo Oliveira e Brito (1998) solos laterizados não-concrecionários, como os latossolos e podzólicos encontram-se em grande parte do território brasileiro, em associações e, neste caso, apresentam relação com o relevo. Os latossolos ocorrem em superfícies aplainadas ou ligeiramente onduladas e bem drenadas, tendo em vista a necessária homogeneização textural entre os horizontes superiores (A e B) e a lixiviação do horizonte B. Por outro lado, os podzólicos ocorrem em posições topográficas com mais declives.

Os três tipos de solo encontrados na região são classificados como solos minerais não-hidromórficos. Tal classificação considera os seguintes parâmetros geotécnicos: textura, espessura das camadas ou horizontes, posição do lençol freático, topografia do terreno, susceptibilidade à inundação ou efeito das marés, aptidão natural, erodibilidade, qualidade como material de empréstimo ou jazida, condições para instalação de fossas sépticas, capacidade de suporte, drenabilidade, condutividade hidráulica e atividade química.

Solos minerais não-hidromórficos compreendem solos desenvolvidos na zona de oxidação do terreno, em ótimas condições de drenagem, pouco afetadas pelo lençol d'água subterrânea e podem se desenvolver de diferentes naturezas ou de coberturas aluvionares ou coluvionares.

No entanto, ao ser coletada a amostra para esta pesquisa, optou-se por recolher o material existente no horizonte C, saprolítico por ser mais

problemático e, portanto, servir mais ao propósito da estabilização pretendida neste estudo.

Além da existência de trabalhos anteriores com solos da mesma jazida, como Vizcarra (2010), a escolha foi feita devido à baixa capacidade suporte apresentada por este solo, na profundidade escolhida para a coleta, o que inviabiliza a utilização deste em bases e sub-bases de pavimentos.

A jazida é conhecida pela alta heterogeneidade e fica localizada nas margens da Av. Brasil, BR 101, próximo ao cruzamento com a estrada Rio-São Paulo, BR 465, como indicado nas Figuras 3.2 e 3.3.

A coleta da amostra de solo foi realizada em maio de 2010 pela autora do presente estudo e pelos técnicos Washington, Leandro, Thiago e Allan do Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ. Foram coletados 10 sacos com cerca de 25 kg cada. A profundidade aproximada da coleta foi 2 m em relação ao topo (horizonte A). Este material foi levado para o Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ onde foi preparado por secagem em estufa a 60°C e destorroamento para então ser utilizado para os ensaios listados na Tabela 3.1.

Os ensaios de caracterização física e química do material foram feitos no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ e Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Os ensaios de caracterização ambiental foram realizados no laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda.

Os resultados destes ensaios serão apresentados no Capítulo 4. Na Figura 3.4 pode ser observado, em detalhe, o solo estudado.

Naturalmente poderia ter sido escolhido um solo mais próximo do local de geração das cinzas a serem estudadas, porém, a intenção é mostrar as potencialidades destes resíduos para estabilização de solos e este tipo escolhido é bastante comum em todo o território nacional, de certa forma tornando-se representativo.

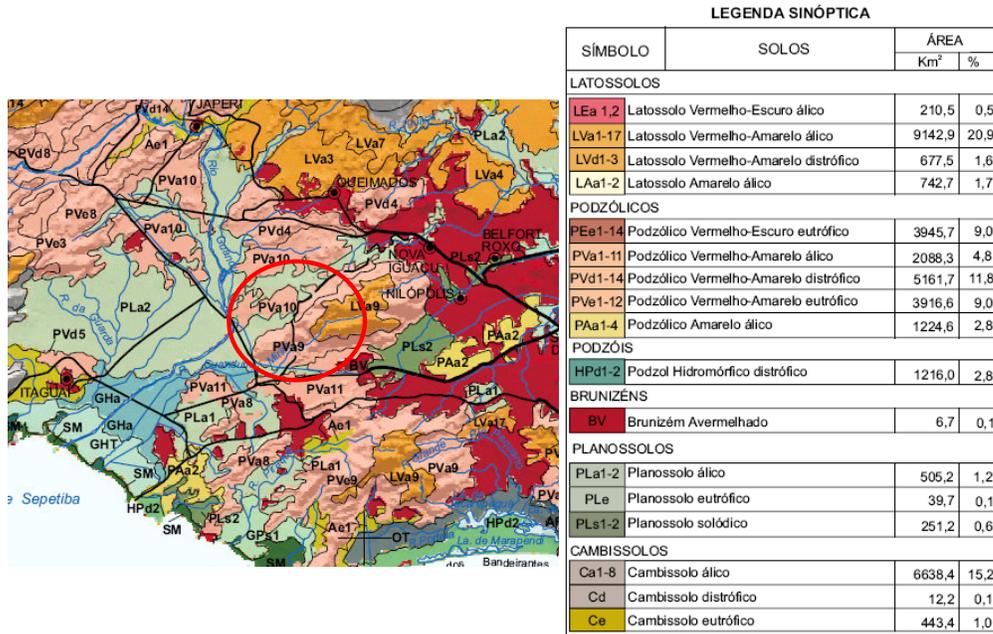


Figura 3.1 - Destaque ao Mapa Pedológico do Estado do Rio de Janeiro na área de estudo (Fonte: DRM-RJ)



Figura 3.2 - Imagem Aérea da Localização da Jazida em Campo Grande (Fonte: Google Maps, 2010)



Figura 3.3 - Aspectos da jazida utilizada para obter o solo deste estudo ressaltando sua heterogeneidade



Figura 3.4 - Detalhe da amostra do Solo utilizado neste estudo após secagem e destorroamento

3.2.2. Cinzas Volante e de Fundo

Ambas as cinzas, volante e de fundo, são provenientes do processo de queima do carvão mineral, originárias do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo, no Estado de Santa Catarina, localizado como indicado na Figura 3.5. Foram encaminhadas por intermédio da SATC – Associação Beneficiante da Indústria Carbonífera de Santa Catarina, em tonéis para o Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, no Rio de Janeiro, para a realização dos ensaios da presente pesquisa.

Os resultados dos ensaios de caracterização realizados nas cinzas, tanto volante como de fundo, cujas aparências são mostradas em detalhes nas

Figuras 3.6 e 3.7, encontram-se no Capítulo 4, bem como a comparação com resultados encontrados por outros autores.

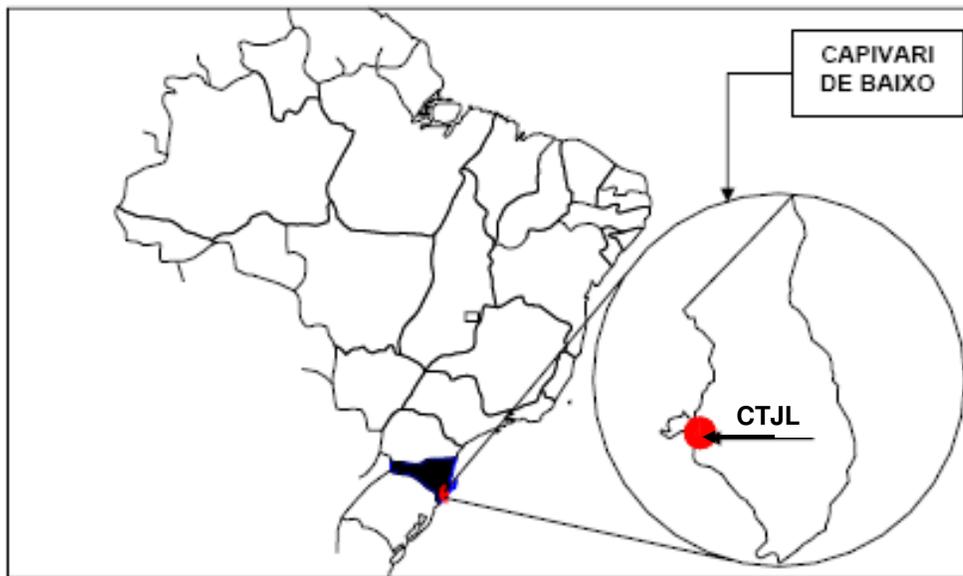


Figura 3.5- Localização do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (Fonte: Leandro, 2005)

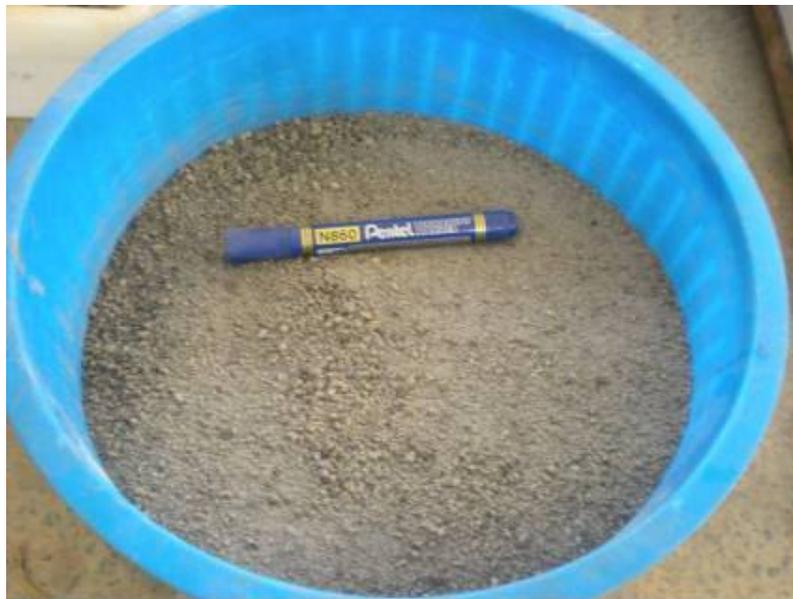


Figura 3.6 – Aspecto da Cinza de Fundo utilizada no presente estudo



Figura 3.7– Aspecto da Cinza Volante utilizada no presente estudo

3.2.2.1. Complexo Termelétrico Jorge Lacerda e a Produção de Cinzas

O Complexo Termelétrico Jorge Lacerda atualmente é considerado o maior complexo termelétrico movido a carvão mineral da América Latina. Pertence à Companhia Tractebel Energia que, por sua vez, faz parte do Grupo Franco-Belga GDF-Suez. Na Figura 3.8 mostra-se um vista da área de depósito das cinzas desta termelétrica, e na Figura 3.9 mostra-se um esquema das várias usinas deste grupo, tiradas da página da empresa.

O complexo é composto por três usinas termelétricas (A, B e C) com capacidade de produção instalada de 857 Megawatts. As usinas utilizam o carvão mineral do tipo CE 4500, conforme classificação da Portaria 100/87 do Conselho Nacional do Petróleo, publicado no Diário Oficial da União em 1º de Abril de 1987, com baixo teor calorífico, e em conseqüência, alto teor de cinzas. As especificações do carvão mineral utilizado, CE 4500, podem ser verificadas no Quadro 3.1, conforme Pozzobon (1999).

As principais atividades envolvidas na geração de energia termelétrica no Complexo Jorge Lacerda incluem a mineração do carvão e seu transporte até as usinas onde ocorre a geração de energia elétrica. Abastece aproximadamente 35% das indústrias, residências e estabelecimentos comerciais de Santa

Catarina, bem como permite a extração e transporte de cinzas para as indústrias de cimento.

De acordo com Pozzobon (1999), dos resíduos produzidos da queima do carvão mineral, são produzidas, aproximadamente, 70% de cinzas volantes, alocadas em silos e posteriormente vendidas para a indústria de cimento, e 3% de cinzas pesadas, destinadas às bacias de decantação.

Quadro 3.1 - Especificações dos Carvões Energéticos Brasileiros. (Fonte: Portaria 100/1987 – CNP)

Características	CE 6000	CE 5900	CE 5200	CE 4700	CE 4500	CE 4200	CE 3700	CE 3300	CE 3100
Poder Calorífico Superior Mínimo Base Seca (Kcal/Kg)	5700	5900	5200	4700	4500	4200	3700	3150	2950
Granulometria (mm)	35X0	50X0	(*)	50X0	(*)	50X0	50X0	50X0	75X0
Umidade Máxima Total (%)	15	20	10	19	10	19	15	17	15
Conteúdo Máximo de Cinza (%)	25	22	35	35	43	40	47	54	57
Conteúdo Máximo de Enxofre (%)	6,5	1,5	2,5	1,5	3,5	1,5	1,5	1,5	1,0
Índice de Inchamento (FSI)	-	-	<2	-	<2	-	-	-	-



Figura 3.8 - Vista Geral do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (Fonte: site da Tractebel Energia, www2.tractebelenergia.com.br/, consultado no dia 14/09/2010)

TRACTEBEL ENERGIA

Plantas em operação: 7.203 MW

Termo 1.213 MW

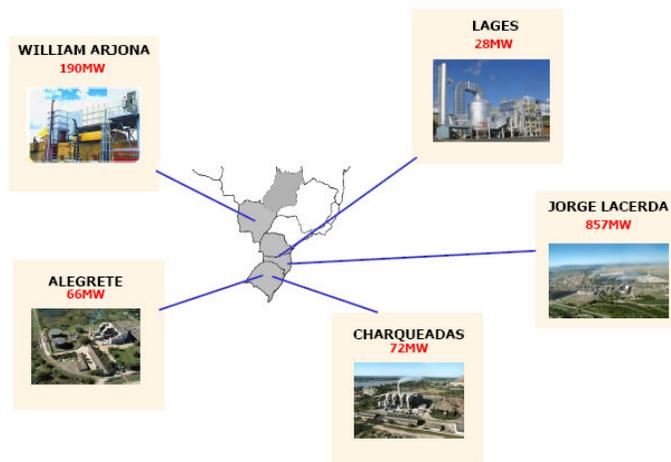


Figura 3.9 - Capacidade instalada TRACTEBEL ENERGIA, set 2010. (Fonte: site da Tractebel Energia, www2.tractebelenergia.com.br/, consultado no dia 14/09/2010)

3.2.3. Cal

A cal utilizada nas misturas deste estudo é cal hidratada calcítica, do tipo CH-III, conhecida comercialmente por “Cal Hidratada Itaú”, da Votorantim Cimentos. No Quadro 3.2 estão apresentados os dados técnicos fornecidos pelo fabricante, de acordo com as exigências da NBR 7175 – Cal Hidratada para Argamassas, como apresentado por Sandroni e Consoli (2010).

No caso da amostra utilizada nesta pesquisa, não foi feito nenhum ensaio de caracterização particular, acreditando-se que o lote comercial empregado atende os requisitos da especificação.

A cal foi adquirida em Junho de 2010 em saco de 20kg e durante todo o estudo foi utilizada a mesma amostra.

Quadro 3.2 - Exigências Físicas e Químicas da Cal (Fonte: Sandroni & Consoli, 2010)

Exigência Físicas e Mecânicas				
		CH I	CH II	CH III
Finura (% Retido Acumulado)	Peneira 0,6mm (máx)	0,50%	0,50%	0,50%
	Peneira 0,075mm (máx)	10%	15%	15%
Retenção de Água (mín)		75%	75%	70%
Incorporação de Areia (mín)		3,00%	2,50%	2,20%
Estabilidade		ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade (mín)		110	110	110
Exigências Químicas				
Anidrido Carbônico (CO₂)	Fábrica (máx)	5%	5%	13%
	Depósito (máx)	7%	7%	15%
Óxidos de Cálcio e Magnésio não hidratado calculado (CaO +MgO) (máx)		10%	15%	15%
Óxidos totais na base de não voláteis (CaOt + MgOt) (mín)		90	88	88

3.2.4. Água

A água utilizada no ensaio de compactação do solo e das misturas solo – cinza e solo – cinza – cal e para moldagem dos corpos-de-prova para os ensaios triaxiais é proveniente da rede pública de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro. Já nos ensaios de caracterização física de limites de Atterberg, análise granulométrica e massa específica real dos grãos, foi utilizada água destilada conforme as normas aplicáveis.

3.2.5. Misturas Solo – Cinza – Cal

Com a finalidade de determinar o “teor ótimo” dos componentes das misturas, para melhoria dos parâmetros de resistência mecânica do solo, visando atender os requisitos mínimos para pavimentos, foram testadas quatro diferentes misturas: duas para dois teores de cinzas volantes (10% e 20%) e duas com cinzas de fundo (30% e 40%).

Os teores de cinzas usados nas misturas foram escolhidos com base na pesquisa bibliográfica e análise de teores utilizados em outros estudos e obras. É importante citar que foram feitos testes preliminares com teores mais elevados de cinzas, mas depois não se prosseguiu com os mesmos dada a dificuldade da retirada dos corpos-de-prova dos moldes utilizados para compactação. Mesmo

aplicando golpes na lateral e uso de vaselina nas paredes do molde, a aderência da mistura continuava danificando a integridade dos corpos-de-prova. Este problema também foi relatado por outros autores, como Silva (2003).

O teor de cal foi arbitrado em 3%, em substituição ao peso seco das cinzas, tendo considerado além de pesquisas anteriores com cinzas de fundo (Leandro, 2002, Farias, 2005 dentre outros), o resultado do ensaio de composição química da cinza volante, que demonstrou concentração de CaO livre, inferior à necessária para a ocorrência de reações pozolânicas.

Na Tabela 3.2 estão apresentados os teores adotados em cada mistura, bem como sua denominação para identificação ao longo do presente trabalho.

Tabela 3.2 – Composição e Teores das Misturas estudadas nesta pesquisa

Material/Mistura	Solo (%)	Cinza de Fundo (%)	Cinza Volante (%)	Cal	Símbolo
Solo	100	-	-	-	S
Cinza de Fundo	-	100	-	-	CF
Cinza Volante	-	-	100	-	CV
Mistura 1	70	27	-	3	S70/CF27/C3
Mistura 2	60	37	-	3	S60/CF37/C3
Mistura 3	90	-	7	3	S90/CV7/C3
Mistura 4	80	-	17	3	S80/CV17/C3
Mistura 5	70	30	-	-	S70/CF30
Mistura 6	60	40	-	-	S60/CF40
Mistura 7	90	-	10	-	S90/CV10
Mistura 8	80	-	20	-	S80/CV20

3.3. Métodos

Nas Figuras 3.10 e 3.11 estão indicadas as etapas adotadas neste trabalho e os itens a seguir descrevem com detalhes os procedimentos adotados, bem como as normas, regulamentações e/ou diretrizes seguidas para a realização dos ensaios.

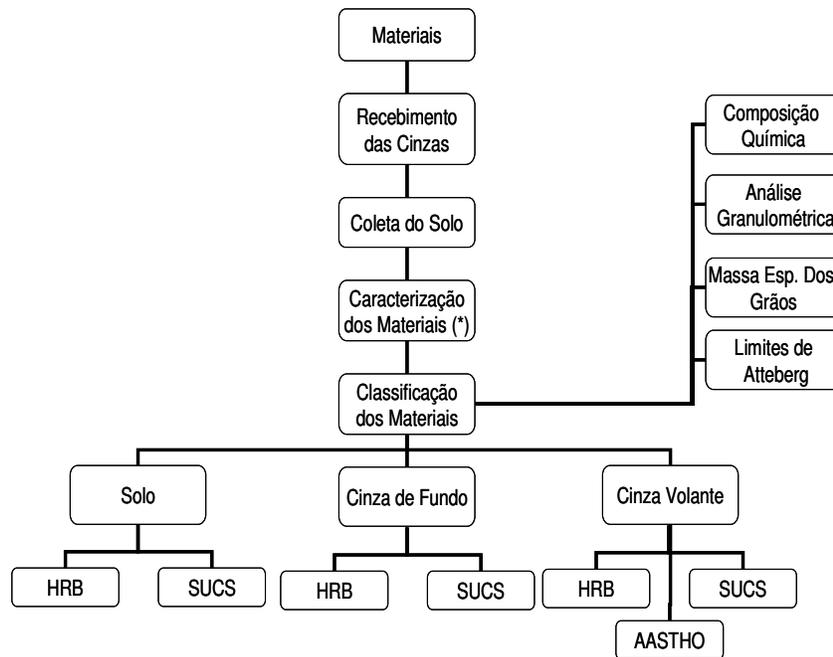


Figura 3.10 - Etapa referente à Caracterização dos Materiais deste estudo.

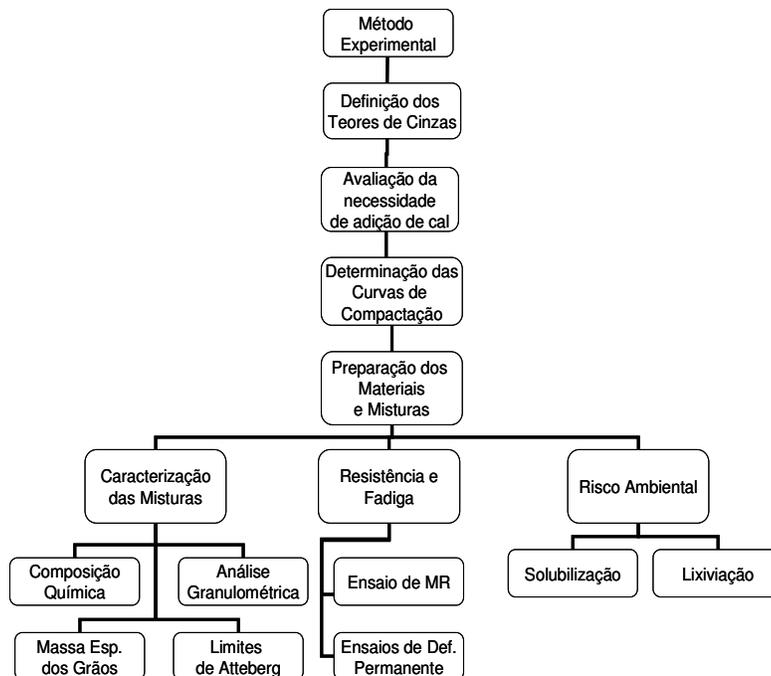


Figura 3.11 - Etapa referente à caracterização mecânica e ambiental dos materiais deste estudo.

3.3.1. Coleta e Preparação das Amostras

As amostras de solo foram coletadas em estado deformado, com auxílio de ferramentas de mão para escavação, transportadas e armazenadas em sacos plásticos devidamente vedados, com todos os cuidados necessários, a fim de evitar a contaminação do solo e grandes alterações de umidade. As amostras de cinza, tanto a pesada como a volante, foram enviadas pela SATC, em tonéis plásticos herméticos, onde ficaram inicialmente armazenadas no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ. Já a cal foi adquirida em embalagens comerciais de 20 kg, e posteriormente armazenada em sacos plásticos vedados para evitar ganhos de umidade, em função da umidade relativa do ar e assim provocar hidratação precoce.

A preparação do solo e das cinzas para os ensaios envolveu procedimentos como a secagem, em estufa a 60°C, para obtenção de maior homogeneidade em toda a amostra, destorroamento, peneiramento e determinação da umidade higroscópica, tais como estabelecidos pela NBR 6457/1986 (ABNT, 1986).

Em seguida os materiais foram armazenados em sacos plásticos devidamente fechados e identificados para a realização dos ensaios, de acordo com o cronograma estabelecido.

3.3.2. Ensaio de Caracterização Física

Os ensaios de caracterização do solo, das cinzas e posteriormente das misturas, envolveram os ensaios de análise granulométrica, densidade específica dos grãos, limites de Atterberg e determinação do teor de umidade natural.

Como citado, os ensaios de caracterização das cinzas, volante e de fundo foram feitos no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio e seguiram os métodos estabelecidos pelas seguintes normas:

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solo. Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica
- NBR 6508/1984 – Solo – Determinação da Massa Específica dos Grãos
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade

A caracterização do solo e das misturas foi feita no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, seguindo os mesmos procedimentos e normas, diferindo somente na determinação da Massa Específica dos Grãos, para o qual foi adotado o procedimento da norma DNER-ME 093/94, seguindo os padrões utilizados neste laboratório.

Os ensaios iniciais foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, por este ser o local do Mestrado da autora. Entretanto, como para a presente pesquisa foram necessários ensaios de Módulo de Resiliência e de Deformação Permanente e o Laboratório da PUC-Rio não possui os equipamentos necessários para a execução dos mesmos, os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ.

3.3.2.1. Limites de Atterberg

Os ensaios para determinação dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), em ambos os laboratórios, foram realizados conforme as normas brasileiras NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984 (ABNT, 1984).

Através dos resultados obtidos destes ensaios, pode ser determinado o Índice de Plasticidade (IP) dos materiais, conforme Equação 3.1, a seguir:

$$IP(\%) = LL(\%) - LP(\%) \quad (3.1)$$

3.3.2.2. Massa Específica dos Grãos

No Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, para a determinação da massa específica dos grãos, tanto da cinza volante como de fundo, foram adotados os procedimentos das NBR 6508/1984 (ABNT, 1984).

E, no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, onde foram determinadas as massas específicas dos grãos do solo e das misturas, adotam-se como padrão os procedimentos da DNER-ME 093/1994 (DNER, 1994), descritos a seguir, similares aos indicados na NBR 6508/1984 (ABNT, 1984).

Depois dos procedimentos para a preparação das amostras, como a secagem em estufa a 60°C, foi separado 10g de material para a realização do

ensaio. Inicialmente, foram obtidos dois pesos, o picnômetro vazio (P_1) e o picnômetro com a amostra em seu interior (P_2), com aquecimento em “banho maria” visando expulsar todas as bolhas de ar (“deaeração”) e posteriormente resfriado à temperatura ambiente. O picnômetro foi cuidadosamente preenchido com água destilada e fechado, obtendo-se o terceiro peso, picnômetro com a amostra e água (P_3). Em seguida, todo o material foi retirado do interior do equipamento, que foi lavado e a seguir enche-se o picnômetro completamente com água destilada, para, enfim, obter-se o último peso (P_4). A partir destas medidas, foi possível determinar a massa específica dos grãos, como demonstrado pelas Equações 3.2.a e 3.2.b:

$$D_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (3.2.a)$$

$$G_s = D_t \times k_{24} \quad (3.2.b)$$

Onde: D_t - densidade real dos grãos a temperatura t

k_{24} - razão entre a densidade relativa da água a temperatura t e a 20°C, tabelada na norma.

G_s - massa específica real dos grãos

3.3.2.3. Análise Granulométrica

Os ensaios de análise granulométrica, para todos os materiais envolvidos, solo, cinzas – volante e de fundo e misturas foram realizados considerando os procedimentos da NBR 7181/1984 (ABNT, 1984).

Tendo em vista que os materiais analisados são constituídos tanto por fração grossa, quanto fina, a análise granulométrica foi feita por granulometria conjunta, englobando as etapas de peneiramento e sedimentação, nesta última, tendo sido utilizado o defloculante hexametáfosfato de sódio.

3.3.3. Ensaio de Caracterização Química e Ambiental

Tendo em vista que uma das principais propostas deste trabalho é a reutilização de resíduos, promovendo práticas sustentáveis, foram realizados

ensaios de caracterização química e ambiental, para verificar a viabilidade da utilização das cinzas sem prejudicar o meio ambiente ou a saúde humana.

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio em conjunto com o departamento de Química, e no laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda., de acordo com a metodologia das seguintes normas:

- NBR 10.004/2004 – Classificação de Resíduos Sólidos
- NBR 10.005/2004 – Lixiviação de Resíduos Sólidos
- NBR 10.006/2004 – Solubilização de Resíduos Sólidos
- NBR 13.600/1996 - Determinação do teor de Matéria Orgânica por Queima à 440 °C

3.3.3.1. Composição Química

Os ensaios de composição química das cinzas, de fundo e volante, e das misturas de solo – cinza - cal foram realizados junto ao departamento de Engenharia Química da PUC-Rio, mediante a técnica de espectrometria de fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDX). O EDX é um instrumento que determina qualitativa e semi-quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra. Isto é possível através da aplicação de raios-X na superfície da amostra e a posterior análise dos fluorescentes raios-X emitidos. É uma técnica não-destrutiva para todos os tipos de amostras, incluindo sólidos, líquidos ou pós, sendo por esta razão interessante para a caracterização dos materiais. Para mais detalhes sobre a técnica pode ser consultado por exemplo em Soares e Saron. (2010).

Neste ensaio, dada a capacidade do equipamento de trabalhar com diferentes tipos de amostras, incluindo os pós, caso das cinzas analisadas, pequena quantidade de cinza foi introduzida no equipamento que rapidamente, gerou os relatórios apresentados no Capítulo seguinte.

3.3.3.2. Teor de Matéria Orgânica

Na determinação do teor de matéria orgânica das misturas solo-cinzas-cal no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, foram seguidas as diretrizes da Norma NBR 13.600/1996 – Determinação do teor de Matéria Orgânica por Queima à 440 °C (ABNT, 1996)

Inicialmente, pequena quantidade de cada uma das misturas analisadas individualmente, S70/CF27/C3, S60/CF37/C3, S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3, foi depositada em um cadinho de massa conhecida e verificada a massa do conjunto (cadinho + mistura + água + matéria orgânica). Em seguida, este conjunto foi colocado em estufa, com temperatura entre 105 e 110°C, para a retirada da umidade, por 24 horas. Após este período, o conjunto (cadinho + mistura + matéria orgânica) teve a massa novamente, verificada. E, finalmente, o material foi submetido à temperatura de 440°C, por um período de 12 horas, na mufla, para queima total da matéria orgânica. Posteriormente, a massa da situação final do conjunto (cadinho+mistura) é verificada e, então, a partir da Equação 3.3, o teor de matéria orgânica pode ser determinado:

$$MO = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

MO = teor de matéria orgânica (%)

A = massa da amostra seca em estufa, à temperatura de 105 a 110°C (g)

B = massa da amostra queimada em mufla, à temperatura de 440°C (g)

3.3.3.3. Ensaios de Solubilização e Lixiviação

Os ensaios de solubilização e lixiviação foram realizados pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda., segundo a Norma NBR 10.006/2004 (ABNT, 2004), com a finalidade de classificar o resíduo, com base na listagem da Norma NBR 10.004/2004 – anexo G (ABNT, 2004), que fornece os valores máximos permitidos para extratos solubilizados.

O ensaio de lixiviação também foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda., segundo a Norma NBR 10.005/2004 (ABNT, 2004).

As amostras de cinza de fundo e volante foram enviadas em caixas plásticas herméticas, contendo aproximadamente 3 kg, cada, para o Laboratório situado em Paulínea, São Paulo. Outros estudos já realizaram os mesmos ensaios em amostras semelhantes, tais como Vizcarra (2010).

3.3.4. Ensaios de Caracterização Mecânica

Os ensaios realizados para verificar os requisitos mecânicos para a aplicação das misturas em pavimentos foram os seguintes: ensaios de compactação, módulo de resiliência e deformação permanente sob carga repetida. Não foram realizados ensaios de Índice Suporte Califórnia e nem resistência à compressão simples, mais tradicionalmente citados em pesquisas anteriores porque a proposta deste estudo é prover avaliações condizentes com o princípio da Mecânica dos Pavimentos.

Foram adotados os procedimentos das seguintes normas para a execução destes ensaios:

- NBR 7182/1986 – Ensaio de Compactação
- DNER ME 131/1994 – Determinação do Módulo de Resiliência
- Procedimento Rede Asfalto 03/2010 – Deformação Permanente em Solos e Britas.

3.3.4.1. Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação para todos os materiais envolvidos (solo, cinzas e misturas) foram realizados de acordo com as diretrizes da NBR 7182/1986 (ABNT, 1986), utilizando-se a energia de compactação Proctor Modificada e sem reuso de material.

As curvas de compactação das cinzas, volante e pesada, foram determinadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, já as referentes ao solo puro e as misturas, no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ. No Laboratório da PUC-Rio, a compactação foi manual, com o cilindro de Proctor, já no Laboratório da COPPE/UFRJ, a compactação foi feita com o auxílio do compactador mecânico, moldando-se corpos – de – prova de 10 cm de diâmetro versus 20cm de altura, em moldes tripartido conforme mostrado na Figura 3.12. A justificativa para o emprego deste tamanho de corpo – de – prova é que este será também utilizado nos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e de deformação permanente.



Figura 3.12 - Compactador Mecânico da COPPE/UFRJ e o molde tripartido utilizado.

Para a determinação de cada curva de compactação, foram feitos de cinco a seis corpos-de-prova com a finalidade de obter a umidade ótima (w_{ot}) e a massa específica aparente máxima seca ($\rho_{dmáx}$) de cada material, individualmente.

3.3.4.2. Ensaio de Módulo de Resiliência ou Resiliente

Segundo Medina & Motta (2005), os ensaios tecnológicos de avaliação das propriedades mecânicas dos materiais de engenharia visam simular as condições reais de solicitação em campo. Considerando que, diferente de outras estruturas de engenharia, inclusive da geotécnica, onde prevalecem as cargas estáticas, os pavimentos e subleitos sofrem solicitações dinâmicas e estão sujeitos a cargas de diferentes intensidades e frequências variáveis ao longo do dia e do ano, a simulação para todas estas condições é de difícil execução. No entanto, uma aproximação adequada é feita com ensaios triaxiais de carga repetida conforme visto na revisão bibliográfica e já é praxe em muitos estudos e projetos no Brasil e no mundo.

O módulo de resiliência (ou módulo resiliente) de solos é por definição a relação entre a tensão vertical desviadora e a deformação resiliente correspondente, e é obtido para vários pares de tensões, confinante (σ_3) e

desviadora (σ_d), para representar melhor o comportamento dos materiais de pavimentação. Através de modelos ajustados por regressão aos pontos experimentais, é possível determinar o comportamento elástico do material, linear ou não linear (este sendo o mais comum).

Neste trabalho foi utilizado o Modelo Composto, que relaciona o módulo de resiliência às tensões confinantes e de desvio, como apresentado na Equação 3.4. Para a obtenção dos coeficientes de regressão (k_1, k_2, k_3) e geração dos gráficos apresentados no Capítulo 4, foi utilizado o programa STATISTICA 7.0.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (3.4)$$

Onde:

MR – módulo resiliente [MPa]

σ_3 - tensão confinante [MPa]

σ_d - tensão desviadora cíclica [MPa]

k_1, k_2, k_3 - coeficientes de regressão, derivados dos ensaios laboratoriais.

Portanto, com a finalidade de obter o Módulo de Resiliência ou Resiliente (MR), foram realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas, de acordo com a norma DNER-ME 131/94 – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência.

No Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, para a realização deste ensaio normalmente são consideradas também as diretrizes atualizadas contidas na dissertação de Vianna (2002) e Ramos (2003), como descritas adiante. O esquema ilustrativo do equipamento é apresentado na Figura 3.13.

Este ensaio consiste em duas etapas: a primeira, de condicionamento do material a ser ensaiado, com a finalidade de minimizar os efeitos da deformação plástica e da história de tensões, e a segunda, consiste na realização do ensaio propriamente dito, visando a obtenção do módulo de resiliência (MR), aplicando-se pares de tensão confinante (σ_3) e desviadora (σ_d) pré- definidos e medindo-se a deformação específica resiliente correspondentes.

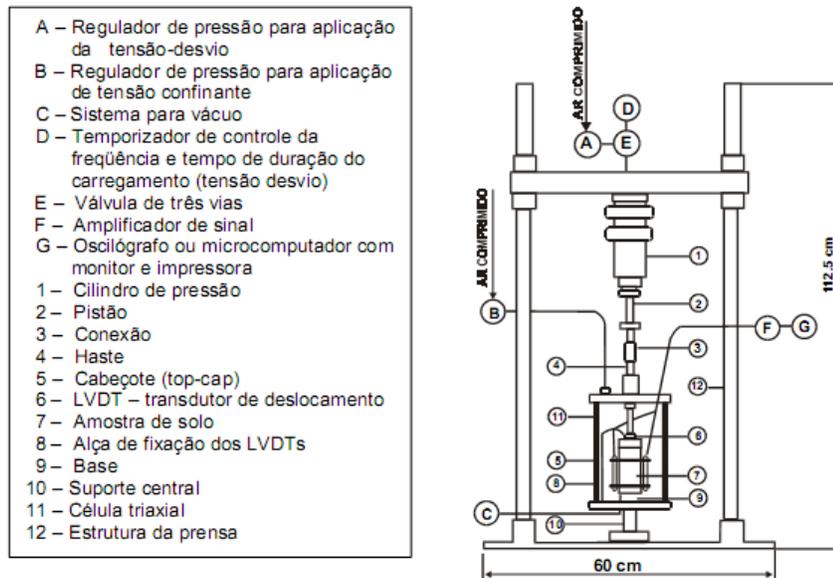


Figura 3.13 - Esquema Ilustrativo do Equipamento de Ensaios Triaxiais de Carga Repetida (Fonte: Medina & Motta, 2005).

Inicialmente, foram moldados 3 corpos-de-prova de cada mistura, nas condições de umidade ótima (w_{ot}) e massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$), conforme determinado previamente pelos ensaios de compactação. Foi utilizada Energia Modificada de compactação para a moldagem destes em compactador mecânico, e com a utilização de moldes tripartidos de 10 x 20cm (diâmetro x altura) presos por duas braçadeiras e fixo a uma base de aço (Figura 3.14). É importante ressaltar que para homogeneização de cada mistura, os teores selecionados de solo, cinza e cal, foram considerados sempre referidos ao peso seco, em estufa à 60°C, do material, para em seguida ocorrer a adição da quantidade de água necessária para atingir a condição de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima após a compactação.

Após a compactação, o conjunto corpo-de-prova/ molde cilíndrico tripartido foi pesado, para então extrair-se cautelosamente o corpo-de-prova do molde por desmonte do cilindro tripartido. É importante ressaltar que o primeiro ensaio do módulo de resiliência de cada corpo-de-prova moldado, isto é, com o tempo de cura de 0 dias, foi realizado logo após a compactação do mesmo.



Figura 3.14 - Molde tripartido 10 X 20cm, para compactação dos corpos-de-prova.

Posteriormente, com uma membrana de látex, envolve-se o corpo-de-prova, assentando-o na pedra porosa, e colocando-o na base do equipamento triaxial (Figura 3.15). Para garantir o confinamento, a membrana de látex é fixada com dois elásticos, um na parte superior e outro na base do aparelho.

Fixam-se os transdutores mecano-eletromagnéticos - LVDT's ("linear variable differential transformer"), e faz-se o pré-ajuste dos mesmos. Coloca-se o invólucro cilíndrico da câmara e a placa superior de vedação, verificando sua correta vedação. Em seguida, repete-se o procedimento de ajuste dos LVDT's, através das guias, na base do equipamento. Inserem-se os dados de entrada necessários na tela de comando do ensaio, dando início, finalmente, à etapa de condicionamento, onde são aplicados 500 pulsos de carga (Figura 3.15), para três níveis de tensão.

Após a etapa de condicionamento, os LVDT's são novamente ajustados e dá-se continuidade à segunda etapa do ensaio, para obtenção do módulo de resiliência (MR). Ao término do ensaio é gerado um relatório contendo informações: pares de tensões, deformações resilientes e módulo de resiliência. Os pares de tensões aplicados durante as duas etapas, de condicionamento e de obtenção do módulo de resiliência estão apresentados no Quadro 3.3.

Tendo em vista que um dos objetivos referentes a este estudo foi a influência do tempo de cura no parâmetro de resistência mecânica adotado, o módulo de resiliência de cada corpo-de-prova das misturas com cal, foi

submetido a quatro ensaios, com diferentes tempos de cura (com 0, 7, 28 e 90 dias), como explicitado na Tabela 3.3a e 3.3b.

Na segunda etapa de ensaios, com corpos-de-prova de misturas sem cal, foram realizados três ensaios para cada corpo-de-prova, com diferentes tempos de cura (com 0, 35 e 90 dias). Esta diferença nos tempos de cura ocorreu devido a questões de prazo e disponibilidade dos equipamentos.

Ainda foram moldados corpos-de-prova somente com solo, denominada solo puro, para efeito de comparação com as adições dos outros materiais, não necessitando de cura.



Figura 3.15 – Montagem do Equipamento do Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas da COPPE/UFRJ (Fotos da autora durante esta pesquisa).

Durante o tempo de cura, ou seja, logo após a realização de cada ensaio, o corpo-de-prova foi armazenado em câmara úmida, a temperatura e umidade constantes. Para melhor conservação dos corpos-de-prova, estes foram envoltos em uma proteção de PVC e vedados em sacos plásticos ao serem dispostos na câmara úmida, após serem devidamente identificados com o número de

protocolo, conforme procedimento adotado no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ e mostrado na Figura 3.16.

Quadro 3.3 - Níveis de tensões utilizados durante o Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas (Fonte: Medina & 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
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

Tabela 3.3a – Datas e tempos de cura dos corpos-de-prova do Ensaio de MR

Mistura	Corpo de Prova	Protocolo COPPE/UFRJ	Tempo de Cura	Data do Ensaio de MR
S70/CF27/C3	CP 1/1	06-2010	0	2/8/2010
			7	9/8/2010
			28	30/8/2010
			90	3/11/2010
	CP 1/2	07-2010	0	2/8/2010
			7	9/8/2010
			28	30/8/2010
			90	3/11/2010
	CP 1/3	08-2010	0	2/8/2010
			7	9/8/2010
			28	30/8/2010
			90	3/11/2010
S60/CF37/C3	CP 2/1	11-2010	0	5/8/2010
			7	12/8/2010
			28	2/9/2010
			90	8/11/2010
	CP 2/2	12-2010	0	5/8/2010
			7	12/8/2010
			28	2/9/2010
			90	8/11/2010
	CP 2/3	14-2010	0	5/8/2010
			7	12/8/2010
			28	2/9/2010
			90	8/11/2010
S90/CV7/C3	CP 3/1	28-2010	0	11/8/2010
			7	18/8/2010
			28	8/9/2010
			90	12/11/2010
	CP 3/2	29-2010	0	11/8/2010
			7	18/8/2010
			28	8/9/2010
			90	12/11/2010
	CP 3/3	30-2010	0	11/8/2010
			7	18/8/2010
			28	8/9/2010
			90	12/11/2010
S80/CV17/C3	CP 4/1	48-2010	0	25/8/2010
			7	1/9/2010
			28	22/9/2010
			90	24/11/2010
	CP 4/2	49-2010	0	25/8/2010
			7	1/9/2010
			28	22/9/2010
			90	24/11/2010
	CP 4/3	50-2010	0	25/8/2010
			7	1/9/2010
			28	22/9/2010
			90	24/11/2010

Tabela 3.3b – Datas e tempos de cura dos corpos-de-prova do Ensaio de MR

Mistura	Corpo de Prova	Protocolo COPPE/UFRJ	Tempo de Cura	Data do Ensaio de MR
S70/CF30	CP 5/1	91-2010	0	7/12/2010
			35	5/1/2011
			90	15/3/2011
	CP 5/2	92-2010	0	7/12/2010
			35	5/1/2011
			90	15/3/2011
	CP 5/3	93-2010	0	7/12/2010
			35	5/1/2011
			90	15/3/2011
S60/CF40	CP 6/1	108-2011	0	5/1/2011
			35	2/2/2011
			90	5/4/2011
	CP 6/2	109-2011	0	5/1/2011
			35	2/2/2011
			90	5/4/2011
	CP 6/3	110-2011	0	5/1/2011
			35	2/2/2011
			90	5/4/2011
S90/CV10	CP 7/1	98-2010	0	14/12/2010
			35	11/1/2011
			90	16/3/2011
	CP 7/2	99-2010	0	14/12/2010
			35	11/1/2011
			90	16/3/2011
	CP 7/3	100-2010	0	14/12/2010
			35	11/1/2011
			90	16/3/2011
S80/CV20	CP 8/1	102-2010	0	16/12/2010
			35	13/1/2011
			90	17/3/2011
	CP 8/2	103-2010	0	16/12/2010
			35	13/1/2011
			90	17/3/2011
	CP 8/3	104-2010	0	16/12/2010
			35	13/1/2011
			90	17/3/2011
S	CP9/1	75-2010	0	20/10/2010
	CP9/2	76-2010	0	20/10/2010
	CP9/3	90-2010	0	1/12/2010



Figura 3.16 – Exemplo de Preparação dos corpos-de-prova após ensaio para Cura em Câmara Úmida desta pesquisa

3.3.4.3. Ensaio de Deformação Permanente

Segundo Bernucci et al. (2006) a deformação permanente é um dos defeitos mais comuns da pavimentação asfáltica, que pode ser atribuída ao revestimento ou às sub-camadas adjacentes – não - asfálticas, abaixo do revestimento. Podem apresentar deformações permanentes devido à densificação adicional pelo tráfego e por ruptura ao cisalhamento - ou ainda a uma combinação destes efeitos.

Tendo em vista esta particularidade dos pavimentos, para melhor análise do desempenho mecânico das misturas estudadas, foram realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas visando avaliar a relação existente entre o número de repetições de carga e a deformação específica permanente acumulada de cada um dos materiais deste estudo.

Os procedimentos de preparação dos corpos-de-prova para este ensaio foram os mesmos utilizados nos ensaios de módulo de resiliência. Foi moldado um corpo-de-prova de cada mistura, para cada tempo de cura, pré-estabelecido como fator de análise (7; 28 e 90 dias). As condições foram de umidade ótima (w_{ot}) e massa específica aparente seca máxima ($\rho_{dmáx}$), determinadas previamente nos ensaios de compactação, Energia Modificada de compactação em compactador mecânico, com a utilização de moldes tripartidos de 10 X 20 cm (diâmetro X altura), como mostrado na Tabela 3.4. Para o ensaio de deformação permanente também foi moldado um corpo-de-prova de solo puro, para efeito de comparação com os demais resultados obtidos.

Tabela 3.4 – Datas e tempos de cura dos corpos-de-prova dos Ensaios de Deformação Permanente

Mistura	corpo-de-prova	Protocolo COPPE/UFRJ	Tempo de Cura	Data do Ensaio de Def. Permanente
S70/CF27/C3	CP 1/5	32-2010	7	18/8/2010
	CP 1/6	33-2010	28	8/9/2010
	CP1/4	09-2010	90	3/11/2010
S60/CF37/C3	CP 2/5	95-2010	7	7/12/2010
	CP 2/6	53-2010	28	22/9/2010
	CP2/4	16-2010	90	9/11/2010
S90/CV7/C3	CP 3/5	64-2010	7	6/10/2010
	CP 3/6	105-2010	28	13/1/2011
	CP3/4	106-2010	90	21/3/2011
S80/CV17/C3	CP 4/5	67-2010	7	29/9/2010
	CP 4/6	68-2010	28	20/10/2010
	CP 4/4	51-2010	90	24/11/2010

É importante ressaltar que, diferentemente dos demais ensaios foi feito somente um corpo-de-prova para cada mistura em cada tempo de cura, dado o longo tempo de duração do ensaio.

O ensaio de deformação permanente, no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ, é realizado no mesmo equipamento detalhado no item anterior. As diferenças entre o procedimento de módulo de resiliência e o ensaio de deformação permanente são: escolhe-se um par de tensões para solicitar o corpo-de-prova; não se faz etapa de condicionamento, dado que as deformações iniciais devem ser consideradas para o cálculo da deformação específica permanente acumulada; a quantidade de golpes de carga aplicados aos corpos-de-prova é maior do que 150.000 ciclos ou interrompe-se se houver ruptura ou acomodamento; e ainda a necessidade do denominado “golpe de contato”, que consiste no primeiro golpe ao corpo de prova, com nível de tensão mais baixo do que o aplicado durante o ensaio, assim diminuindo a possibilidade de leituras equivocadas, por falta de contato entre o corpo de prova e o equipamento. É importante ressaltar que a frequência adotada nos golpes, durante o ensaio, é de 1 Hz.

Segundo Guimarães (2001) grandes acréscimos na deformação permanente ocorrem somente nos primeiros ciclos dos 150.000 golpes seguintes, a partir daí a taxa de crescimento cai consideravelmente, tornando-se praticamente constante, com pequenos valores de escoamento plástico para a maioria dos materiais de pavimentação compactados devidamente na umidade ótima e massa específica máxima.

Para a realização do ensaio foi selecionado um par de tensões, baseando-se nos estudos de Guimarães (2009), com a tensão confinante (σ_3) igual a 0,1 MPa e a tensão desviadora (σ_d), 0,4 MPa. Quanto ao número de golpes, o ensaio é interrompido quando é verificada uma estabilização da deformação permanente (acomodamento), critério também adotado no presente estudo.

Ensaio de deformação permanente para as misturas sem a presença de cal, segunda etapa do estudo, não foram realizados por questões de prazo e disponibilidade de equipamento, mas são indicados como proposta para futuras pesquisas.

3.3.5. Dimensionamento do Pavimento Típico

Visando uma análise mecanística-empírica da viabilidade de aplicação das misturas estudadas em bases ou sub-bases de pavimentos utilizou-se o Programa Computacional SisPav (Franco,2007), que emprega a Análise de Múltiplas Camadas, para obter tensões e deformações devido aos carregamentos. De acordo com Franco (2007), a abordagem da análise elástica não linear, feita pelo programa, é realizada de forma simplificada, com a divisão das camadas com este comportamento em três subcamadas.

Na Figura 3.17 é ilustrado o fluxograma básico no qual foi baseado o desenvolvimento do SisPav, com os detalhamentos para análise da influência do clima, da combinação dos diversos tipos de eixos e da variação lateral do tráfego.

Na presente pesquisa, foi adotada uma estrutura de pavimento típico, considerada por Vizcarra (2010) mantendo constantes as propriedades mecânicas do revestimento asfáltico e do subleito, variando-se somente a espessura da base ou sub-base, de acordo com os parâmetros de resiliência para as misturas estudadas, como mostrado na Figura 3.18. É importante ressaltar que os dados de clima utilizados na análise do programa, foram característicos do Rio de Janeiro, já inseridos na base de dados do SisPav, e que, ainda para fins de cálculo, os dados de tráfego inseridos são correspondentes a rodovia de baixo volume de tráfego, mais detalhados no Capítulo seguinte, onde serão apresentados os resultados.

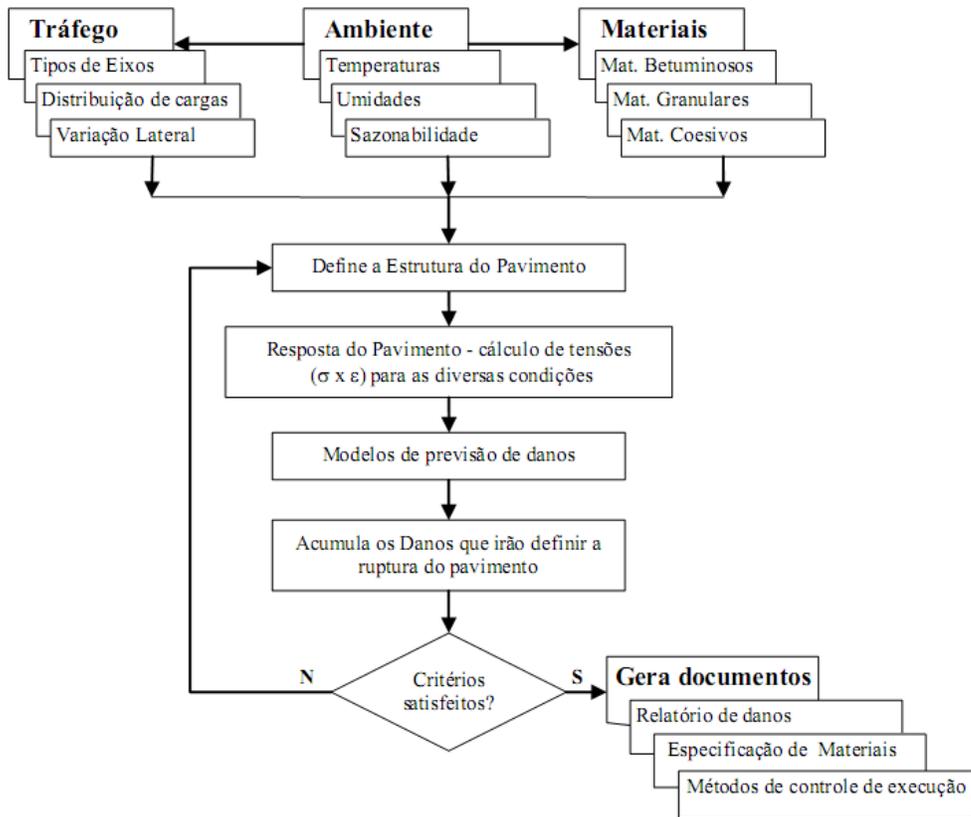


Figura 3.17 – Fluxograma de Desenvolvimento do SisPav (Fonte: Franco,2007)

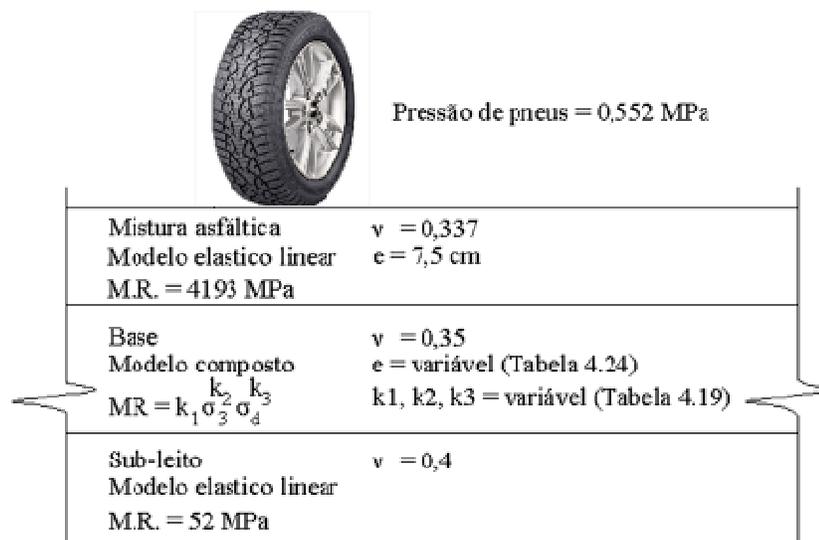


Figura 3.18 – Estrutura do Pavimento Típico adotada para a análise mecânica-empírica (Fonte: Vizcarra,2010)

Para o dimensionamento do pavimento, foram inseridos os resultados obtidos nos ensaios de Módulo de Resiliência de cada mistura estudada, no

programa computacional SisPav, utilizando o critério de ruptura estrutural por fadiga da mistura asfáltica.

O modelo utilizado pelo programa, válido para misturas asfálticas com ligantes convencionais, foi obtido por Franco (2007), com base em ensaios, também realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ e apresentado na Equação 3.5.

$$N_f = fcl \cdot 1,904 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon_t^{-2,821} \cdot MR^{-0,74} \quad (3.5)$$

Sendo:

N_f = vida de fadiga

fcl = 10000 (fator campo-laboratório)

ε_t = deformação específica de tração

MR = módulo de resiliência da mistura asfáltica (MPa)

A vida de fadiga no tratante a pavimentos e ao modelo estudado consiste na quantidade de ciclos de carregamento que o pavimento é capaz de suportar sem romper e/ou apresentar outros danos ou patologias.

De posse dos resultados obtidos com o SisPav, foram comparadas as espessuras de camada (base) e período de projeto para cada mistura estudada, analisando seu comportamento mecânico e viabilidade técnica e econômica de aplicação.