

3

Programa Experimental

O programa de ensaios estabelecido tem como objetivo principal investigar e identificar o efeito da adição de cinzas de RSU nas propriedades mecânicas de um solo residual. Para tal, foi desenvolvido um programa experimental que se baseia em duas etapas distintas.

Na primeira etapa foi realizado o estudo do comportamento mecânico dos materiais através de ensaios de laboratório, englobando ensaios triaxiais de carga repetida. Na segunda etapa foi avaliado o comportamento dos materiais envolvidos no dimensionamento de uma estrutura de pavimento típica, mediante uso de programa computacional.

As etapas do programa experimental proposto são detalhadamente descritas neste capítulo, bem como a descrição dos materiais utilizados na pesquisa, os métodos utilizados na preparação das amostras, detalhes de execução dos ensaios e equipamentos utilizados nos ensaios de laboratório.

Os ensaios do programa experimental desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Geotecnia/Pavimentos e no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, bem como no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente e Laboratório de Química da PUC-Rio.

3.1.

Materiais

Trabalhou-se com três tipos de materiais distintos: solo, cinza volante e cinza de fundo, bem como as misturas decorrentes destes materiais com diferentes teores de cinza.

3.1.1.

Solo

O solo é procedente de uma jazida localizada no bairro de Campo Grande – RJ. A coleta foi feita no mês de Junho/2009. Este solo foi escolhido por ser de uso regional e ser material de pesquisa de outras teses da COPPE/UFRJ, onde os ensaios foram desenvolvidos. Os resultados da caracterização deste material são apresentados no Capítulo 4. A Figura 3.1 ilustra o solo não-laterítico estudado.



Figura 3.1. Solo não-laterítico estudado

3.1.2.

Cinza Volante e Cinza de Fundo

A cinza volante e a cinza de fundo são provenientes da incineração do Resíduo Sólido Urbano (RSU) na Usina Verde, que fica localizada na Ilha do Fundão – Município de Rio de Janeiro – RJ. A incineração e coleta foram realizadas no mês de Junho/2009. As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram a cinza volante e a cinza de fundo de RSU, respectivamente.



Figura 3.2. Cinza Volante de RSU.



Figura 3.3. Cinza de Fundo de RSU.

3.1.2.1.

Produção das Cinzas de RSU

A Usina Verde é uma empresa de capital privado situada na Cidade Universitária da UFRJ - Ilha do Fundão, e tem como objetivo apresentar soluções ambientais para a destinação final dos resíduos sólidos urbanos, através do processo de incineração com co-geração de energia. Atualmente, a Usina Verde vem tratando o Resíduo Sólido Urbano (RSU), e procura, através do processo de incineração, propiciar o aproveitamento racional do lixo, convertendo-o, se possível, em insumos.

O RSU utilizado na Usina Verde vem da Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro (Comlurb), já pré-tratados, provenientes do aterro sanitário da Comlurb, no bairro Cajú/RJ. Todavia, ao chegar à usina, passa por uma nova triagem. A composição do RSU após processo de reciclagem da Comlurb e da Usina Verde encontra-se na Figura 3.4. Em funcionamento desde 2004, a Usina recebe diariamente 30 toneladas de resíduos sólidos.

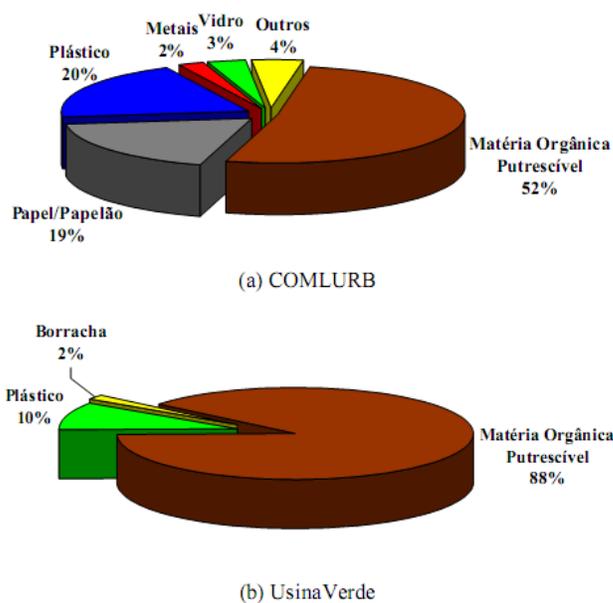


Figura 3.4. Composição do RSU da Usina Verde (FONTES, 2008)

3.1.2.2.

Processo de incineração

Esta descrição está baseada em FONTES (2008) que estudou estes resíduos para uso em concreto de cimento Portland para construção civil: “O

RSU, após a etapa de pesagem, passa pelo processo de triagem, como dito anteriormente, onde os materiais recicláveis são segregados manualmente e com o auxílio de detectores de metais localizados nas duas esteiras, por onde os resíduos são conduzidos. Após a segunda esteira, o RSU é triturado e o material fino separado com o auxílio de peneira rotativa e encaminhado para secagem, visando a redução do teor de 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 (matéria orgânica e resíduos combustíveis não recicláveis) são encaminhados 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.”

“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). Em seguida, a cinza volante é encaminhada para os tanques de decantação onde periodicamente é retirada e armazenada em caçambas.”

“Ao final do processo de incineração são obtidos de 8 a 10%, em volume, das duas cinzas, que representam cerca de 80% de cinza pesada e 20% de cinza volante (dados fornecidos pela Usina Verde S/A). A cinza de fundo está sendo testada, em substituição à areia, na fabricação de tijolos e pisos. As cinzas não utilizadas são encaminhadas ao Aterro metropolitano Jardim Gramacho, localizado em Duque de Caxias/RJ.” (FONTES, 2008).

Nas Figuras 3.5 a 3.7 são apresentados as etapas do processo de incineração as quais são submetidos os Resíduos para a geração de energia elétrica na Usina Verde.

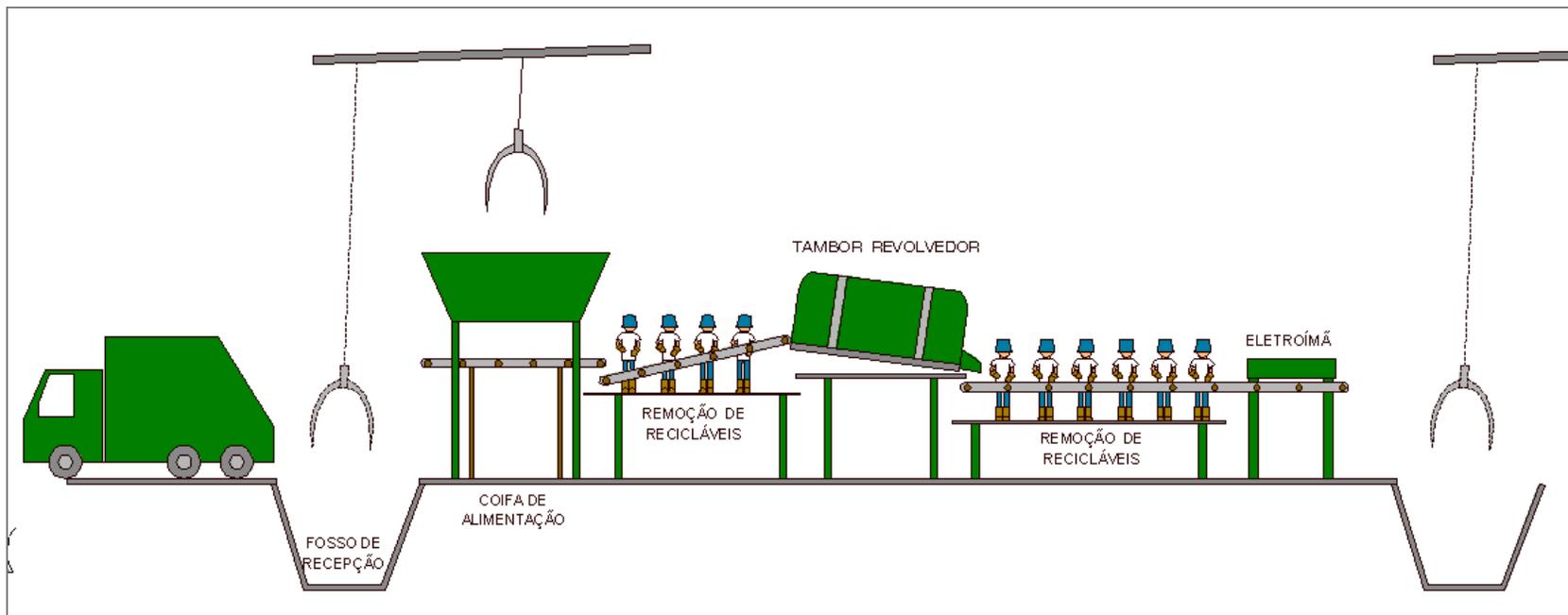


Figura 3.5. Segregação de materiais para reciclagem na Usina Verde (USINA VERDE, 2009)

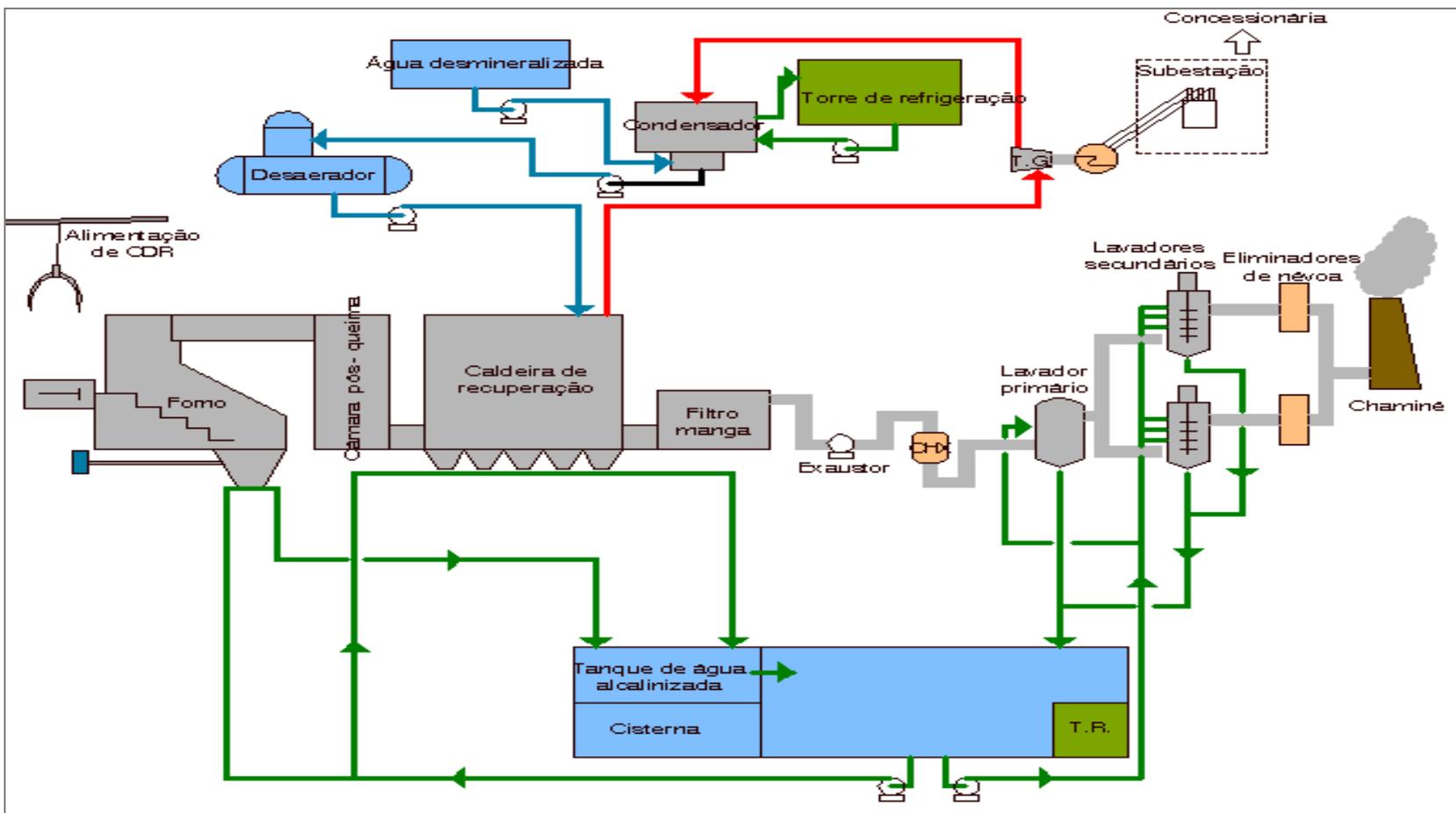


Figura 3.6. Processo de geração de energia elétrica na Usina Verde (USINA VERDE, 2009)



(a) Pesagem do RSU



(b) Processo de triagem



(c) Câmara de pós combustão



(d) Sistema de lavagem dos gases



(e) Cinza de fundo



(f) cinza volante (CVRSU)

Figura 3.7. Etapas do processo de incineração de RSU na Usina Verde S/A
(FONTES, 2008)

FONTES (2008) conclui no seu estudo que a argamassa testada contendo cinza volante do resíduo sólido urbano apresentou resultados mecânicos, físicos e de durabilidade superiores à referência. A presença da cinza, provavelmente, promoveu o acréscimo destes parâmetros através da ação física de refinamento dos poros. A distribuição de poros mostrou a redução dos grandes capilares, proporcionando o acréscimo no volume dos médios e pequenos capilares num concreto de alto desempenho.

3.1.3.

Misturas Solo-cinza

O solo e as cinzas foram secados ao ar e logo após armazenados e etiquetados em sacos plásticos com capacidade de 25 Kg. Um dia antes da preparação de cada mistura foi medida a umidade de cada material. As misturas solo-cinza foram dosadas em peso seco do material. Após a mistura à seco foi adicionada a quantidade de água necessária para conseguir o teor de umidade desejado para a compactação e logo depois armazenadas em sacos plásticos, para preservar a umidade e guardadas por um dia na câmara úmida do laboratório, para promover a homogeneização da umidade em todo o material.

As siglas que descrevem os materiais utilizados estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Símbolos referentes a cada material.

Material/Mistura	% de Solo	% de Cinza Volante	% de Cinza de Fundo	Símbolo
Solo	100	0	0	S
Cinza Volante	0	100	0	CV
Cinza de Fundo	0	0	100	CF
Mistura 1	60	40	0	S60/CV40
Mistura 2	60	0	40	S60/CF40
Mistura 3	80	20	0	S80/CV20
Mistura 4	80	0	20	S80/CF20

3.2.

Métodos e Procedimentos de Ensaio

Apresenta-se neste item a metodologia e procedimentos utilizados para as análises físicas, químicas e mineralógicas do solo, das cinzas e respectivas misturas.

O objetivo da realização deste programa experimental foi a caracterização do solo e do solo-cinza, evidenciando os parâmetros que possam ser correlacionados com o real desempenho em camadas de pavimentos e, dessa forma, contribuir para o melhor conhecimento sobre o comportamento das misturas estudadas.

A seguir são apresentados os ensaios laboratoriais realizados para caracterização do solo e do solo-cinza:

a) Propriedades físicas e de classificação dos materiais:

- Densidade Real dos Grãos;
- Limites de Atterberg;
- Análise granulométrica;
- MCT (Miniatura, compactados, tropical).

b) Propriedades químicas:

- Análise química total;
- Determinação de matéria orgânica;
- Solubilização.

c) Propriedades mecânicas:

- Compactação;
- Modulo de Resiliência.
- Deformação permanente.

Para caracterização dos materiais, foram realizados ensaios de densidade real dos grãos, Limites de Atterberg e análise granulométrica. No ensaio de compactação foram obtidos os parâmetros de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

Através do ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas determinou-se o Modulo Resiliente, para se obter os coeficientes do Modelo composto, que são alguns dos dados de entrada do programa SisPav.

Os ensaios de composição química e teor de matéria orgânica foram realizados com o objetivo de caracterizar as amostras de solo e cinza. Os ensaios de solubilização fornecem os resultados utilizados na classificação das

cinzas, de acordo com as definições da norma NBR 10004/2004 (ABNT, 2004) para resíduos sólidos.

3.2.1.

Ensaio de Caracterização física e classificação dos materiais.

Para determinar as propriedades-índice das amostras de solo foram executados os ensaios de caracterização física. O material proveniente de amostras deformadas foi preparado conforme o procedimento da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio e no Laboratório de Geotecnia/Pavimentos da COPPE/UFRJ. As normas utilizadas são citadas a seguir:

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

3.2.1.1.

Massa Específica Real dos Grãos

Para a determinação da massa específica dos grãos foi realizado o ensaio segundo a *NBR 6508/1984 – Massa específica real dos grãos*, utilizando amostras deformadas do solo. Foi misturado com água destilada 25g do material destorroado e passado na peneira 0,42mm (No. 40) e deixado em repouso por 24 horas. Em seguida foi realizada a deaeração da mistura através da aplicação de vácuo até que não fossem mais detectadas bolhas de ar.

3.2.1.2.

Limites de Atterberg

Visando caracterizar a interação do solo com a água, os ensaios de limite de liquidez e de limite de plasticidade foram realizados segundo a *NBR*

6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez e a NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

Através dos dados obtidos por meio desses ensaios e também de análise granulométrica foram determinados:

- Índice de plasticidade (IP, %), obtido através da diferença entre o limite de liquidez (LL, %) e o limite de plasticidade (LP, %): $IP = LL - LP$;

3.2.1.3.

Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada conforme 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, peneiramento e sedimentação. Para a etapa correspondente à sedimentação foram realizados ensaios com defloculante (hexametáfosfato de sódio).

O ensaio de sedimentação foi executado com 50g de solo passante na peneira 0,42mm (#40) colocado em 125ml 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 1000ml onde o restante do volume foi completado com água destilada para então serem realizadas as devidas leituras. Após as leituras o material foi colocado na peneira 0,075mm (#200) e submetido ao processo de lavagem com movimentos circulares e suaves. Por último, foi levado à estufa para secagem e pesagem.

3.2.1.4.

Ensaio de MCT

A metodologia MCT foi desenvolvida por NOGAMI e VILLIBOR nos anos 1980 e 1981, com o objetivo de classificação de solos tropicais e principalmente diferenciar se o solo tem comportamento laterítico ou não-laterítico.

Para o ensaio de MCT o material tem que ser integralmente passante na peneira 10 (2,0 mm) ou apresentar uma fração retida nesta peneira que não seja significativa (<10%).

A Metodología de Classificação MCT, baseada em propriedades mecânicas e hidráulicas obtidas em corpos de prova compactados em dimensões reduzidas foi desenvolvida especialmente para os solos tropicais e

teve sua normalização regulamentada em 1994, pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1994).

A Metodologia MCT utiliza corpos de prova miniatura, compactados mediante procedimento especial mostrado na Figura 3.6 que ilustra o equipamento MCT.

Para a obtenção de dados visando especificamente a classificação MCT de um solo utilizam-se dois dos ensaios da metodologia: o ensaio de Compactação e o ensaio de Perda de Massa por Imersão, que apresentam as características descritas a seguir (conforme a ABPV, 2009):

1. “Ensaio de Compactação:

Da amostra seca ao ar e passada na peneira de 2 mm separam-se pelo menos 5 porções colocando-as em diferentes umidades. Toma-se uma porção com determinada umidade (H1) e pesam-se 200g, introduzindo-a no molde que deve ser devidamente posicionado no equipamento de compactação, sendo utilizado junto do cilindro de compactação um espaçador. Dá-se o primeiro golpe ($n=1$) e mede-se a altura A_1 . Retira-se o espaçador e repetem-se as operações de medida de altura após o primeiro golpe, para $n=2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, \dots, n, \dots, 4n$, sendo finalizada a compactação quando:

- A diferença de altura entre leituras sucessivas for menor que 0,1 mm (em relação à primeira condição para finalização da compactação, a norma DNER-ME 258/94 (DNER, 1994) diz que se deve interromper a compactação quando a diferença entre leituras a_{4n} – na for menor que 2,0 mm);
- $4n$ golpes atingir 256 golpes;
- Houver nítida expulsão de água no CP.

Repetem-se as operações para os outros teores de umidade, H2, H3, H4, e assim sucessivamente.”

São obtidos então 2 coeficientes (c' e d'), descritos a seguir (ABPV, 2009):

“*Curvas de Deformabilidade (Mini-MCV) – Coeficiente c' :*

Para cada teor de umidade traça-se a curva n_x ($a_{4n} - a_n$) (número de golpes x diferença de altura) em escala monolog (\log_{10}) para n . Estas curvas de deformabilidade são denominadas curvas Mini-MCV, porque a partir delas pode-se determinar o valor da condição de umidade, tomando-se a curva correspondente a um determinado teor

de umidade e procurando-se sua interseção com a reta de equação $a=2\text{mm}$, que foi adotada como referência para os CP da metodologia, determinando assim o valor de golpes B_i correspondente. Define-se Mini MCV para cada teor de umidade pela expressão:

$$\text{Mini MCV} = 10 \times \text{Log}_{10} (B_i) \quad (3.2)$$

O coeficiente c' é o coeficiente angular (sem sinal) da reta “assimilável” à curva Mini MCV igual a 10, a ser obtida diretamente ou por interpolação gráfica apropriada, visto que raramente se obtém uma com Mini-MCV igual a 10. Segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995) o coeficiente c' relaciona-se aproximadamente com a granulometria, de acordo com a tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores típicos de c' para diferentes granulometrias de solos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Tipo de Solo	Coeficiente c'
Argilas e solos argilosos	Acima de 1,5 – Elevado
Solos de vários tipos granulométricos como areia argilosa, argila siltosa, etc.	$1,5 > c' > 1,0$
Areia e siltes não plásticos ou pouco coesivos	Abaixo de 1,0 - Baixo



Figura 3.8. Compactador MCT da COPPE/UFRJ usado nesta pesquisa.

a) *Curvas de Compactação – Coeficiente d'*:

Calculadas as massas específicas aparentes secas (MEAS), traça-se a família de curvas de compactação. O coeficiente d' é definido como a inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação correspondente expresso em %. Valores típicos de d' estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Valores típicos de d' para diferentes granulometrias de solos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Tipo de Solo	Coeficiente d'
Argilas lateríticas	Geralmente $d' > 20$
Argilas não lateríticas	Frequentemente possuem valores $d' < 10$
Areias puras	d' baixo
Areias finas argilosas	d' muito elevado (pode ultrapassar 100)
Siltosos, Micáceos e/ou Cauliníticos	d' muito pequeno frequentemente $d' < 5$

2. Ensaio de Perda de Massa por Imersão em Água (ABPV, 2009):

“O ensaio de perda de massa por imersão foi desenvolvido com o objetivo específico de distinguir o comportamento laterítico do não laterítico, quando os mesmos possuem características similares no que se relaciona a:

- Inclinação do ramo seco da curva de compactação Mini-MCV, correspondente a 12 golpes, soquete leve (coeficiente d');
- Inclinação da curva Mini-MCV (ou de deformabilidade), correspondente a condições padronizadas.

Para determinação do valor de perda de massa por imersão são utilizados os corpos de prova compactados segundo o procedimento Mini-MCV. Os CPs são parcialmente extraídos dos moldes de compactação, de maneira que fiquem com saliência de 10mm, e imersos em uma cuba preenchida com água, anotando-se o comportamento nas primeiras horas. Após pelo menos 20 horas esgota-se a água e secam-se as cápsulas que contêm a parte desagregada para pesagem. Obtém-se o “Pi”, expresso pela massa seca em percentagem da massa seca da parte do corpo de prova inicialmente saliente, para cada teor de umidade.

O fator de desprendimento é dado da seguinte forma:

- Desprendimento do solo em bloco coeso – 0,5;
- Não desprendimento de solo – zero;
- Solo desprender esfarelado – 1,0.

O “Pi considerado” é o valor de “Pi” multiplicado pelo valor de desprendimento.

O valor de “Pi” a ser usado para fins classificatórios é obtido por interpolação gráfica, traçando-se a curva de variação das percentagens acima obtidas, “Pi considerado” x Mini MCV, procurando-se o valor correspondente a Mini MCV 10 ou 15, conforme se trate de solo de baixa ou elevada massa específica aparente, conceito fixado de acordo com o seguinte: considera-se baixa MEAS quando a altura final do corpo de prova para Mini-MCV igual a 10 for igual ou maior que 48 mm e elevada MEAS quando não se obtiver a condição anterior.” As Figuras 3.9 e 3.10 apresentam a perda de massa por imersão.



Figura 3.9. Cápsulas imersas para o ensaio imediatamente após imersão.



Figura 3.10. Perda por imersão do solo deste estudo após 20 horas de imersão.

3. Classificação Geotécnica MCT:

A classificação geotécnica MCT baseia-se na determinação de algumas propriedades mecânicas e hidráulicas em CPs de 50 mm de diâmetro. Nessas condições, é apropriada apenas para solos de granulação fina, que passam integralmente na peneira de 2,0 mm ou que têm uma percentagem desprezível retida nesta peneira, ou que a sua influência nas propriedades do solo possa ser avaliada para que os resultados obtidos sejam devidamente corrigidos (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). Os ensaios e dados a serem obtidos, em resumo, são:

a) *Ensaio de compactação – Procedimento Mini-MCV*

- Coeficiente c' ;
- Curva Mini-MCV x Teor de Umidade (h);
- Coeficiente d' .

b) *Ensaio de Perda de massa por imersão*

- Perda de massa “Pi”, correspondente a Mini-MCV 10 (MEAS baixa) ou Mini-MCV 15 (MEAS alta);
- Curva “Pi” x Mini MCV, que pode ser necessária como critério auxiliar de decisão.

c) *Cálculo do índice e' pelo emprego da expressão:*

$$e' = \frac{3}{\sqrt{100 + \frac{20}{d'}}} \quad (3.2)$$

Onde:

d' = coeficiente angular do ramo seco da curva de compactação referente a energia de 12 golpes no ensaio Mini-MCV;

Pi = perda por imersão (em %).

A determinação do grupo classificatório se dá a partir do gráfico em que se tem no eixo das abscissas, o coeficiente c' e no eixo das ordenadas, o coeficiente e' . Este gráfico será mostrado no capítulo 4.

O grupo é obtido diretamente no gráfico, exceto quando o ponto cai sobre uma das proximidades dos limites “L/N” (comportamento laterítico – não-laterítico), prevalecendo o seguinte critério (ABPV, 2009):

- Será considerado “L” quando o Pi decrescer tendendo a zero, no intervalo Mini-MCV de 10 a 20 e a curva Mini-MCV = $f(h)$ apresentam concavidade para cima no intervalo Mini-MCV de 1 a 15;

- Será “N” quando o Pi variar de maneira diferente e a referida curva apresentar-se sensivelmente retilínea ou com concavidade para baixo;
- Será considerado transicional, representado por símbolo duplo dos grupos adjacentes quando as condições não correspondem às acima especificadas;
- Ponto cai longe dos limites porém não satisfaz as condições descritas para a identificação do comportamento “L” ou “N”. A interpretação dos grupos da classificação pode ficar prejudicada.

VERTAMATTI (1988) discutiu as dificuldades do uso das classificações tradicionais e apresentou uma relação de propostas de diversos autores, que incluem a consideração de aspectos como Índice de Atividade de Skempton; características pedogenéticas dos solos; relações moleculares sílica/alumina e sílica/sesquióxidos; resistência ao impacto, ao esmagamento e capacidade de troca catiônica; potencial eletro-resistivo; grau de intemperismo da rocha matriz; geomorfologia de solos lateríticos; peso específico e índice de vazios; absorção de água por lateritas; porosimetria; resistividade à cal, dentre outros.

3.2.2.

Ensaio Químico

Devido ao fato de se trabalhar com cinzas de resíduo sólido urbano, é importante a execução de ensaios químicos para determinação de compostos, perigosos ou não, para que então se tenha certeza da viabilidade da utilização deste resíduo quando misturado ao solo.

3.2.2.1.

Composição Química

A composição química total das amostras de cinzas foi obtida mediante a técnica *“Espectrometria de fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDX)”*

As amostras foram submetidas a análise por EDX em um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva, modelo EDX-720, marca Shimadzu no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ, o qual está ilustrado na Figura 3.11.

O Espectrômetro de fluorescência de raios-X é um instrumento que determina qualitativamente 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.



Figura 3.11 Equipamento de EDX do LABEST da COPPE/UFRJ usado nesta pesquisa.

3.2.2.2.

Teor de Matéria Orgânica

Para o solo, cinza volante e cinza de fundo, o teor de carbono orgânico é determinado por oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, usando o sulfato de prata como catalizador, sendo o excesso de dicromato após a oxidação, dosado por titulação com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal, utilizando difenilamina como indicador (DIAS e LIMA, 2004). Os ensaios foram feitos no Laboratório de Geotecnia/Química de solos da COPPE/UFRJ.

O teor de carbono assim obtido é multiplicado por 1,724 obtendo-se o teor de matéria orgânica. Este fator é utilizado em virtude de se admitir que, na composição média do húmus, o carbono participa com 58%. (EMBRAPA, 1997).

Para as misturas solo-cinza volante e solo-cinza de fundo, os ensaios foram feitos no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, foi utilizada a Norma

ABNT NBR 13600/1996 – Solo – Determinação de do teor de matéria orgânica por queima a 440° C, seguindo o seguinte procedimento:

- i) Pesa-se o cadinho. (Massa da tara);
- ii) Coloca-se uma quantidade aleatória de amostra em cada cadinho (Massa da Tara + Solo + água + M.Org.);
- iii) Coloca-se o cadinho na estufa pra tirar umidade da amostra (estufa com temperatura entre 105°C e 110°C), durante 24h;
- iv) Depois das 24 horas, pesa-se de novo. (Massa da Tara + Solo + M. Org.);
- v) Em seguida, coloca-se o cadinho na Mufla, à 440°C, deixando ali por 12 h para ocorrer a queima total da matéria orgânica;
- vi) Passadas às 12 horas, pesa-se novamente o cadinho (Massa da Tara + Solo);
- vii) Para calcular o teor de matéria orgânica, utiliza-se a equação:

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

Onde:

MO = teor de matéria orgânica

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

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

3.2.2.3.

Solubilização e Lixiviação

O ensaio de solubilização foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda., segundo a Norma NBR 10006/2004 (ABNT, 2004), com a finalidade de classificar o resíduo. Para esta classificação foi utilizada a listagem da Norma NBR 10004/2004 – anexo G (ABNT, 2004). Esta listagem fornece os valores máximos permitidos para extratos solubilizados. Portanto, quando a análise dos elementos químicos do extrato solubilizado apresenta algum valor superior ao da referida listagem, o resíduo é classificado como não inerte, caso contrario, este é classificado como resíduo inerte de acordo com as definições apresentadas na norma NBR 10004/2004 para resíduos sólidos. O ensaio de solubilização é realizado em duplicata.

O ensaio de lixiviação foi realizado pelo laboratório TASQA Serviços Analíticos Ltda., segundo a Norma NBR 10005/2004 (ABNT, 2004).

3.2.3.

Ensaio de Caracterização Mecânica

3.2.3.1.

Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação foi realizado na energia Proctor Modificado segundo a norma *NBR 7182/86 – Solo - Ensaio de Compactação*, com o intuito de determinar a umidade ótima de compactação ($w_{ótima}$) e o peso específico seco aparente máximo ($\gamma_{d_{máx}}$).

Após secar o material ao ar até se obter um teor suficientemente baixo de umidade para destorroá-lo, passou-se pela peneira #4, segundo a norma NBR 6457/86 (preparação com secagem prévia até a umidade higroscópica).

Adicionou-se uma determinada quantidade de água ao material, até que este ficou com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima, que pode ser estimada *à priori* pelo conhecimento do limite de plasticidade, cujo valor pode ser próximo à umidade ótima. Homogeneizou-se bem a mistura e deixou-se na câmara úmida por um tempo de 24 horas.

A amostra retirou-se da câmara úmida e uma porção dela colocou-se dentro do molde cilíndrico de diâmetro 10 cm para ensaio proctor. Aplicou-se 27 golpes com um soquete de massa de 4,54kg que se deixa cair a uma altura de 45,72cm na camada de solo. A porção do solo compactado deve ocupar cerca de um quinto da altura total do molde. O material é escarificado para conseguir uma melhor aderência entre as camadas. A segunda camada é colocada e o procedimento é repetido. Quando se completam cinco camadas, atinge-se uma altura maior do que a do molde. Isto é possível porque o molde, cuja altura é de 12,73cm, possui um colarinho, que é removido ao final do ensaio, e permite então, retirar o excesso e acertar o volume em relação à altura do molde.

O cilindro é pesado junto com o solo. Assim, com o peso total do corpo de prova e o volume é possível calcular a sua massa específica úmida. Tirando três amostras do seu interior (na parte média), determina-se sua umidade. Com estes dois índices físicos, calcula-se a massa específica seca.

Outro corpo de prova é preparado sem reuso do material, com uma quantidade maior de água (para aumentar a sua umidade em uns 2%

aproximadamente). Uma nova compactação é feita e um novo par de valores umidade (w) e massa específica seca (γ_d) é obtido. O procedimento se repete até que a densidade seca máxima obtida nos ensaios prévios reduza duas ou três vezes.

Com todos os pontos obtidos, plota-se um gráfico de massa específica seca versus umidade, e com eles, desenha-se a curva de compactação. Os valores de $w_{ót\text{m}}$ e $\gamma_{d\text{máx}}$ da curva de compactação foram usados para moldar os corpos de prova para os ensaios de módulo resiliente, CBR e deformação permanente.

3.2.3.2.

Ensaio de Módulo de Resiliência ou Módulo Resiliente.

Nos ensaios triaxiais de carga repetida, uma tensão vertical ou tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) é aplicada no topo da amostra, sempre no sentido de compressão, de forma cíclica, promovendo um carregamento e descarregamento, dependendo da frequência e magnitude que se deseja, enquanto a tensão confinante, σ_3 , permanece constante.

Numa fase inicial, promove-se um condicionamento do material a ensaiar, eliminando ou minimizando os efeitos da deformação plástica e da história de tensões.

A segunda fase é a realização do ensaio para obtenção do módulo resiliente (MR), com aplicações de pares de tensões desvio (σ_d) e confinante (σ_3) medindo-se a deformação específica resiliente.

Como o Módulo é a relação entre a tensão e a deformação resiliente, pode-se obter o módulo para qualquer par de tensões desvio e confinante, através da equação obtida por regressão, que possibilita determinar o comportamento elástico do material, em função de parâmetros experimentais K e das tensões atuantes no pavimento e subleito.

Os procedimentos para a realização do Ensaio Triaxial Dinâmico na determinação do Módulo de Resiliência em amostras de solos, são descritos no método *ME 131/94, Solos – Determinação do Módulo de Resiliência* do DNER. Recomenda-se a tese de VIANNA (2002) como atualização deste método.

A seguir, são apresentadas as diversas fases de execução do ensaio em amostras conforme realizado no Laboratório de Geotecnia/Pavimentos da COPPE/UFRJ (RAMOS, 2003):

1. Preparação dos Corpos- de- Prova:

“Inicialmente são realizados os procedimentos normalmente adotados para ensaios em amostras deformadas de solos, isto é, secagem, destorroamento e quartearamento. Em seguida determina-se a umidade higroscópica e obtém-se a massa específica seca máxima e umidade ótima através das curvas de compactação no Proctor Normal para o subleito, Intermediário para sub-base e Modificado ou Intermediário para a base. Deve-se tomar uma quantidade de solo suficiente para preencher o molde de compactação e adiciona-se água complementar até ser atingida a umidade ótima, sendo então o material homogeneizado e acondicionados em sacos plásticos hermeticamente fechados que ficarão em câmara úmida por um período mínimo de 12 horas. Decorrido o tempo mínimo para a distribuição homogênea da umidade ótima no solo, procede-se à compactação do material, em camadas, por impacto, através de um soquete movido por um compactador mecânico (Figura 3.12), na energia especificada para a amostra.”

“A compactação do material é realizada em um cilindro tripartido de aço preso por duas braçadeiras e fixado a uma base de aço com três parafusos. Este molde possui as dimensões 10 cm de diâmetro x 20 cm de altura (razão 1:2) (Figura 3.13) que é compatível com a granulometria fina do solo e do material granular até 1 polegada. Em caso de material mais graúdo, pode-se usar molde de dimensões 15 cm de diâmetro x 30 cm de altura, sendo empregado este molde para muitas bases de brita graduada ou corrida ou lastro de ferrovia. Após a conclusão do processo de compactação, o corpo de prova no cilindro é pesado, em seguida são afrouxados os parafusos das braçadeiras, permitindo remover cada uma das partes do molde, para a retirada do corpo de prova sem que ocorram danos.”

“Posteriormente, o corpo-de-prova é envolvido com uma membrana de látex, estando o mesmo assentado em uma base porosa e com o cabeçote já posicionado sobre o corpo de prova. Para garantir o confinamento, elásticos são colocados de forma a fixar a membrana elástica no cabeçote e na base do aparelho.”



Figura 3.12. Equipamento mecânico para compactação de corpos de prova.



Figura 3.13. Molde tripartido 10 x 20 cm, para compactação de corpos de prova.

2. Montagem do Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas (RAMOS, 2003):

“Para que se tenha uma garantia na qualidade do Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas é necessário muito cuidado na montagem do corpo de prova no aparelho de ensaio, cujo esquema ilustrativo é apresentado na Figura 3.14,

mostrando os diversos componentes do equipamento utilizado para a realização do ensaio triaxial. De forma sucinta os procedimentos adotados são:

- Coloca-se o corpo de prova envolvido na membrana de borracha, já com a base porosa, na base do aparelho e o cabeçote sobre o mesmo;
- Realiza-se a fixação dos transdutores mecano-eletromagnéticos do tipo LVDT ("linear variable differential transformer"), presos ao cabeçote superior e apoiado numa haste guia que se estende até a base, onde se localiza o parafuso de ajuste que se liga externamente à célula, neste ponto devem ser pré-ajustados os LVDTs;
- Em seguida, é colocado o invólucro cilíndrico da câmara e a placa superior de vedação, sendo corretamente fixada;
- Novamente se promove o ajuste dos transdutores, através de guias na base do aparelho e observando o monitor do computador que registra os deslocamentos dos LVDTs;
- Com os dados do material, do molde e da energia de compactação utilizada registrados na tela de comando do ensaio, dão-se início ao condicionamento que é aplicação de 500 pulsos de carga para minimizar os efeitos da deformação plástica e da história de tensões, sendo que o equipamento triaxial da COPPE/UFRJ já está automaticamente programado para realização desta fase;
- Após condicionamento, ajustam-se novamente os transdutores e inicia-se o ensaio triaxial, onde as condições para o ensaio já estão programadas;
- Ao término do ensaio, pode-se verificar os valores e os gráficos diretamente no monitor, possibilitando sua impressão imediata, e caso todos os pontos tenham sido computados ou nenhuma anomalia verificada, o ensaio pode ser dado como terminado e o corpo de prova deve ser retirado imediatamente para pesagem e secagem em estufa. Havendo qualquer anomalia nos resultados, pode-se imediatamente reiniciar o ensaio triaxial, sem a necessidade de proceder ao condicionamento."

Para maior ilustração do ensaio, a Figura 3.15 apresenta o equipamento de Ensaio Triaxiais de Carga Repetida do Laboratório de Geotecnia/Pavimentos da COPPE/UFRJ usado nesta pesquisa.

Em linhas gerais, a metodologia empregada atualmente pela COPPE/UFRJ para realização dos ensaios triaxiais dinâmicos, independente do

material e da energia, considera para a fase de condicionamento, a aplicação de cerca de 500 vezes o par de tensões desvio e confinante, com os níveis de tensões apresentados na Tabela 3.4.

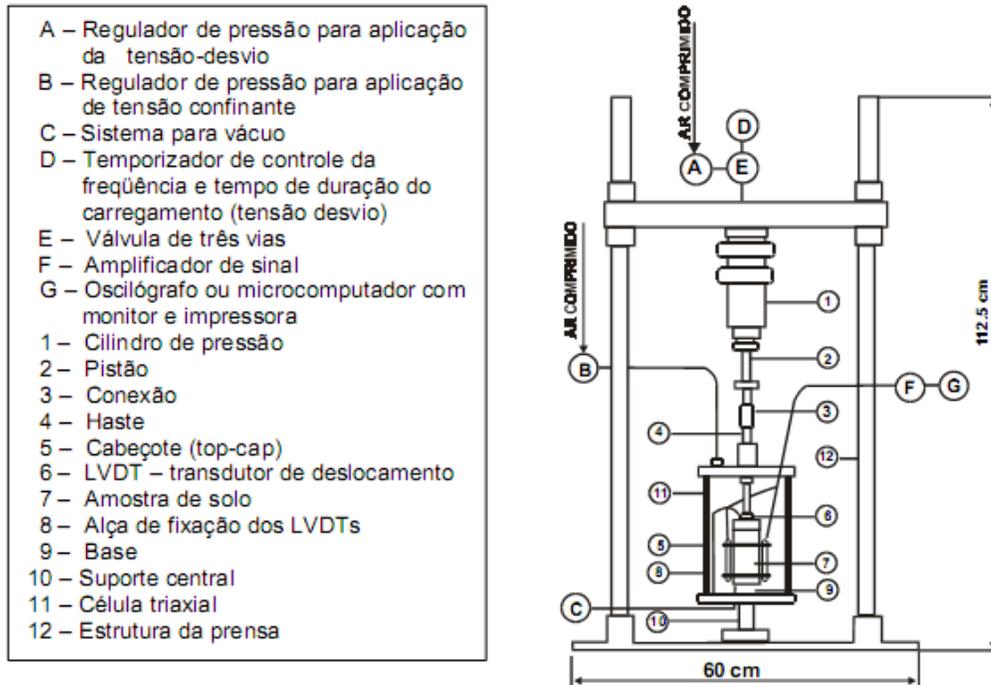


Figura 3.14- Esquema Ilustrativo do Equipamento de Ensaios Triaxiais de Carga Repetida (MEDINA e MOTTA, 2005).

Tabela 3.4. Níveis de tensões aplicados na fase de condicionamento (COPPE/UFRJ)

Tensão confinante, σ_3 (MPa)	Tensão desvio, σ_d (MPa)	Razão de tensões, σ_1/σ_3
0,07	0,07	2
0,07	0,21	4
0,105	0,315	4

Durante a fase do ensaio para obtenção do módulo são aplicados os níveis de tensões, apresentados na Tabela 3.5. Aplicam-se cerca de 5 vezes a tensão desvio, ou mais, caso o programa não registre um bom sinal.



Figura 3.15. Equipamento de Ensaio Triaxiais de Carga Repetida da COPPE/UFRJ usado nesta pesquisa.

Tabela 3.5 – Níveis de Tensões utilizados durante o Ensaio Triaxial Dinâmico especificado pela COPPE (MEDINA e MOTTA, 2005).

Tensão confinante, σ_3 (MPa)	Tensão desvio, σ_d (MPa)	Razão de tensões, σ_1/σ_3
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

3.2.3.3.

Ensaio de CBR

O Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR - California Bearing Ratio), padronizado no Brasil pela Norma DNER-ME 049/94 (DNER, 1994), é a relação, em porcentagem, entre a pressão exercida por um pistão de diâmetro padronizado necessária à penetração no solo até determinado ponto (0,1" e 0,2") e a pressão necessária para que o mesmo pistão penetre a mesma quantidade em solo-padrão de brita graduada. As etapas do ensaio são: compactação, imersão em água, medida da expansão e da resistência à penetração após 96 horas.

Através do ensaio de CBR é possível conhecer qual será a expansão de um solo sob um pavimento quando este estiver saturado, e fornece indicações, de caráter empírico, da perda de resistência do solo com a saturação.

O Ensaio consta de duas etapas, segundo o procedimento a seguir (ABNT, 1987):

1. Expansão:

- Coloca-se o disco espaçador no cilindro de diâmetro = 152 mm; altura total = 177,8 mm, cobrindo-o com papel filtro;
- Compacta-se o corpo de prova à umidade ótima e energia modificada (05 camadas e 55 golpes do soquete caindo de 45 cm) e, invertendo-se o cilindro, substitui-se o disco espaçador pelo prato perfurado com haste de expansão e pesos, colocando papel-filtro entre o prato e o solo. Esse peso ou sobrecarga corresponderá ao do pavimento e não deverá ser inferior a 4,5kg;
- Imerge-se o cilindro com o corpo de prova e sobrecarga no tanque durante 96 horas, de tal forma que a água banhe o material tanto pelo topo quanto pela base;
- Realizam-se leituras de deformação (expansão ou recalque) com aproximação de 0,01mm. a cada 24h; como ilustrado na Figura 3.16.

Para calcular a expansão (%) do solo num dado instante usa-se o quociente:

$$E = \frac{h - h_i}{h_i} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde:

$h - h_i$ = deformação até o instante considerado;

h_i = altura inicial do corpo de prova.

2. Penetração:

- Instala-se o conjunto, molde cilíndrico com corpo de prova e sobrecarga, na prensa;
- Assenta-se o pistão da prensa na superfície do topo do corpo de prova, zerando-se em seguida os extensômetros;
- Aplica-se o carregamento com velocidade de 1,27 mm/min, anotando-se a carga e a penetração a cada 30 segundos até decorridos o tempo de 6 minutos, como ilustrado na Figura 3.17.



Figura 3.16. Tomada de leitura de deformação no ensaio CBR na amostra desta pesquisa.

Com os pares de valores da fase de penetração, traça-se o gráfico que relaciona a carga, em ordenadas às penetrações, nas abscissas. Do gráfico obtém-se, por interpolação, as cargas associadas às penetrações de 2,5 e 5,0mm, as quais serão convertidas a valores de pressão, dividindo-as pela área do pistão. O CBR se obtém mediante a seguinte equação:

$$CBR = \frac{\text{pressão calculado no ensaio}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (3.5)$$

O resultado final para o CBR determinado será o maior dos dois valores encontrados correspondentes às penetrações de 2,5 e 5,0mm.



Figura 3.17. Fotografia do Equipamento utilizado para obtenção do CBR nesta pesquisa.

3.2.4

Dimensionamento de pavimento típico

Adotou-se uma estrutura de pavimento típico, no qual a espessura e as propriedades mecânicas do revestimento asfáltico e do subleito ficassem constantes, de maneira que só se possa mudar a espessura da base, de acordo com os parâmetros de resiliência para cada material (solo ou misturas), tal como se ilustra na Figura 3.18. Os dados do subleito e revestimento são os adotados no exemplo do SisPav.

Para a análise mecanística-empírica utilizou-se o programa computacional SisPav (FRANCO, 2007), o qual utiliza a Análise Elástica de Múltiplas Camadas, para obter tensões e deformações devido aos carregamentos. A abordagem da análise elástica não linear é realizada de forma simplificada, com a divisão das camadas com este comportamento em três subcamadas. O procedimento de dimensionamento de pavimentos do SisPav ilustra-se na Figura 3.19.

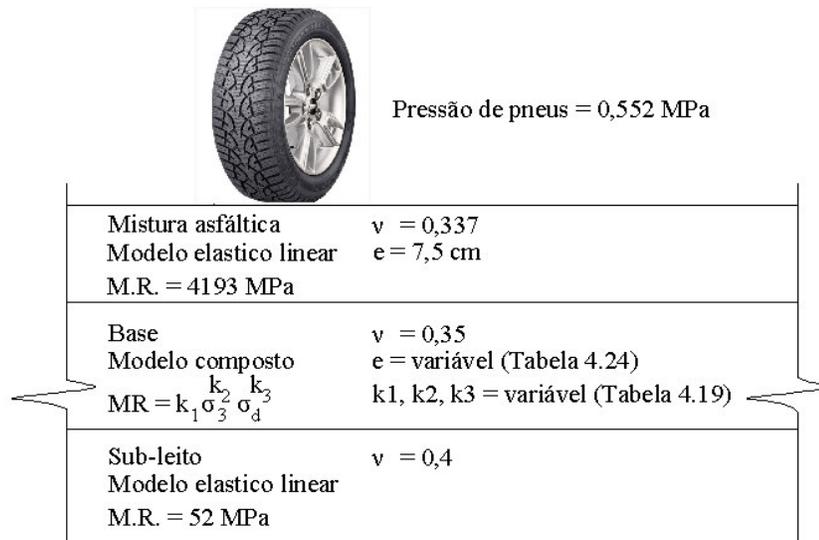


Figura 3.18. Estrutura do pavimento típico adotada para a análise mecanística-empírica.

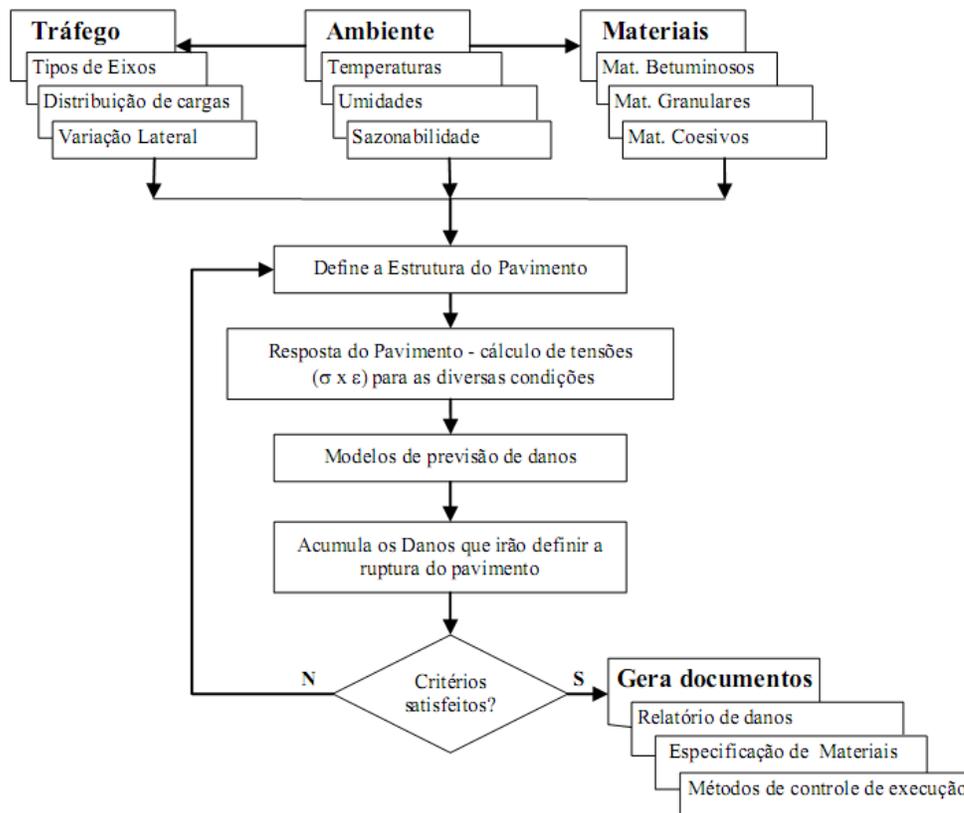


Figura 3.19. Fluxograma do método integrado de análise e dimensionamento de pavimentos asfálticos do SisPav (FRANCO, 2007).

Adotou-se também dados do clima do Rio de Janeiro que estão inseridos na base de dados do SisPav, e dados de tráfego correspondentes a uma rodovia de baixo volume de tráfego, que serão mencionados com detalhe no Capítulo 4.

Os parâmetros obtidos dos ensaios de Módulo de Resiliência foram inseridos no SisPav, dimensionando o pavimento utilizando o critério de ruptura estrutural por fadiga da mistura asfáltica.

O modelo utilizado é o mostrado na equação (3.6), válido para misturas asfálticas com ligantes convencionais, obtido por FRANCO (2007) tendo como base 536 ensaios realizados no Laboratório de Geotecnia/Pavimentos da COPPE/UFRJ.

$$N_f = fcl \cdot 1,904 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_t^{-2,821} \cdot M_r^{-0,74} \quad (3.6)$$

Onde:

N_f = vida de fadiga.

fcl = 10000 (fator campo-laboratório)

ϵ_t = deformação específica de tração

M_r = módulo de resiliência da mistura asfáltica, em MPa

Feitas estas análises para cada material, foram comparadas as estruturas tomando como parâmetros a espessura de camada e o período de projeto.

3.3.

Considerações sobre o Programa Experimental

O Programa Experimental definido e executado neste estudo se mostrou adequado à investigação do comportamento solo-cinza proposto, onde se procurou realizar ensaios em diversos Laboratórios das duas instituições envolvidas no desenvolvimento desta pesquisa (PUC-Rio e COPPE/UFRJ), para que se tivesse a maior quantidade de dados possível para a investigação do comportamento dos materiais estudados, dentro do limite de tempo que uma dissertação de mestrado compreende. Muitas vezes este prazo limita a continuidade no estudo, principalmente neste caso, onde existem ainda poucas referências bibliográficas sobre o assunto.