

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Rodrigo Carreira Weber

**CINZAS PESADAS GERADAS NA REGIÃO CARBONÍFERA
DO RIO GRANDE DO SUL: USO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE**

Porto Alegre
dezembro 2010

RODRIGO CARREIRA WEBER

**CINZAS PESADAS GERADAS NA REGIÃO CARBONÍFERA
DO RIO GRANDE DO SUL: USO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Suyen Matsumura Nakahara

Porto Alegre
dezembro 2010

RODRIGO CARREIRA WEBER

**CINZAS PESADAS GERADAS NA REGIÃO CARBONÍFERA
DO RIO GRANDE DO SUL: USO EM MISTURAS
ASFÁLTICAS A QUENTE**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 29 de novembro de 2010

Profa. Suyen Matsumura Nakahara
Dra. pela EPUSP
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

José Eduardo Mallmann
Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

Prof. Suyen Matsumura Nakahara
Dra. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho a minha mãe, Valéria Vasconcellos
Carreira, que sempre me apoiou durante esta etapa da
minha vida.

AGRADECIMENTO

Com grande respeito gostaria de agradecer a minha família por todo apoio e incentivo dado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a Profa. Suyen Matsumura Nakahara pelos conhecimentos transmitidos, paciência, atenção dedicada e orientação desse trabalho.

Também agradeço a Profa. Carin Maria Scmitt por toda dedicação dada para que se alcançasse um trabalho de boa qualidade.

Aos colegas do LAPAV por sempre terem oferecido auxílio quando necessário.

A todos os amigos pelo apoio, conselhos e palavras de conforto.

À CIENTEC pelo apoio prestado, disponibilizando material para ensaio e informações.

Dar menos que seu melhor é sacrificar o dom que você
recebeu.

Steve Prefontaine.

RESUMO

WEBER, R. C. **Cinzas pesadas geradas na região Carbonífera do Rio Grande do Sul: uso em misturas asfálticas a quente.** 2010. 77 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho analisa a cinza pesada, resíduo oriundo da combustão do carvão fóssil para geração de energia, para uso em misturas asfálticas de camadas de revestimento. O impacto ambiental criado pelo excesso desse resíduo sólido e a grande demanda por material natural necessário para os serviços de pavimentação, são razões importantes para o desenvolvimento de pesquisas na área de sustentabilidade na Engenharia. Um revestimento asfáltico deve ser capaz de resistir aos esforços que recebe do tráfego e transmitir segurança e conforto aos usuários, sem apresentar defeitos. Para avaliação das misturas asfálticas a quente, que serão utilizadas em camadas de revestimento, são necessários alguns ensaios convencionais tais como: estabilidade Marshall, fluência, resistência à tração e módulo de resiliência. A primeira etapa do trabalho consistiu em pesquisa bibliográfica para estudar as características físicas e químicas das cinzas pesadas, como também sua classificação com relação à periculosidade. Durante a segunda etapa, foram confeccionados corpos-de-prova com diferentes percentuais de cinzas pesadas e foram determinadas as estabilidades Marshall, fluência, módulos de resiliência e resistência à tração. Essa etapa foi importante para descobrir o percentual ótimo de cinzas na mistura. A terceira etapa consistiu na análise dos resultados obtidos nos ensaios, comparando-os com uma mistura convencional e na análise mecânica com os parâmetros. Observou-se que de forma geral as misturas com cinza pesada mostraram desempenho satisfatório, satisfazendo aos mínimos recomendados por normas brasileiras.

Palavras-chave: cinza pesada; pavimentação; mistura asfáltica; meio ambiente; periculosidade; ensaios mecânicos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama do delineamento da pesquisa.....	17
Figura 2: cinza pesada gerada na Aracruz – Guaíba/RS.....	22
Figura 3: caracterização e classificação de resíduos sólidos.....	24
Figura 4: depósito de cinzas a céu aberto e contato com solo.....	27
Figura 5: estrutura do pavimento.....	28
Figura 6: etapas do processo de moldagem.....	34
Figura 7: esquema do equipamento de módulo de resiliência.....	38
Figura 8: fluxograma de um dimensionamento mecânico de pavimento.....	40
Figura 9: tela inicial do Everstress 5.0.....	43
Figura 10: tensões aplicadas na estrutura do pavimento.....	43
Figura 11: cinza pesada utilizada.....	48
Figura 12: curva granulométrica da cinza pesada utilizada.....	49
Figura 13: faixa granulométrica de trabalho (faixa C do DNIT).....	50
Figura 14: material sendo separado nas frações de moldagem.....	52
Figura 15: prensa Marshall para compactação dos CP.....	53
Figura 16: CP moldados.....	54
Figura 17: CP sendo ensaiado à tração.....	55
Figura 18: CP após ter sido ensaiado à tração.....	55
Figura 19: CP no ensaio de módulo de resiliência.....	56
Figura 20: resultado da estabilidade Marshall.....	59
Figura 21: resultados da fluência.....	60
Figura 22: comparação das estabilidades Marshall.....	60
Figura 23: comparação das fluências.....	61
Figura 24: resultados dos módulos de resiliência.....	61
Figura 25: comparação dos módulos de resiliência.....	62
Figura 26: resultados das resistências à tração.....	63
Figura 27: comparação das resistências à tração.....	63
Figura 28: resultados das relações MR/RT.....	64
Figura 29: comparação das relações MR/RT.....	64
Figura 30: estrutura de referência.....	66
Figura 31: parâmetros de entrada Everstress 5.0.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: termelétricas brasileiras que utilizam carvão fóssil como combustível, em operação, construção e projeto: capacidades máximas de produção de cinzas ano.....	19
Quadro 2: resultados médios das análises elementares das cinzas pesadas.....	20
Quadro 3: análises granulométricas das cinzas pesadas.....	21
Quadro 4: exigências químicas para classificação das classes de pozôlanas.....	22
Quadro 5: resultados dos ensaios de lixiviação em cinzas pesadas.....	25
Quadro 6: resultados de ensaios de sais solúveis nas cinzas pesadas.....	25
Quadro 7: resultados dos ensaios de solubilização das cinzas pesadas.....	26
Quadro 8: exemplo da composição dos agregados (percentual passante na peneira).....	32
Quadro 9: composição do projeto experimental.....	44
Quadro 10: distribuição granulométrica dos agregados.....	45
Quadro 11: características dos agregados utilizados na mistura asfáltica.....	46
Quadro 12: especificação brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo CAP 50-70.....	47
Quadro 13: resultados dos ensaios de compactação e ISC das cinzas pesada.....	49
Quadro 14: composição granulométrica da mistura asfáltica com 6% de cinza pesada...	51
Quadro 15: composição granulométrica da mistura asfáltica com 10% de cinza pesada.	51
Quadro 16: temperatura de moldagem do CAP 50-70.....	53
Quadro 17: limites para uso das misturas de acordo com o DNIT	58
Quadro 18: parâmetros Marshall	58
Quadro 19: valores para estabilidade e fluência, baseado na NBR 12891	59
Quadro 20: resultados das análises mecânicas.....	67

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia

CAP: Cimento Asfáltico do Petróleo

CP: corpo-de-prova

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

ISC: Índice Suporte Califórnia

LAPAV: Laboratório de Pavimentação

LVDT: *Linear variable differential transformer*

MR: módulo de resiliência

N: número de repetições de eixo padrão

RT: resistência à tração

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MÉTODO DE PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
2.2.1 Objetivo Principal	14
2.2.2 Objetivos Secundários	14
2.3 HIPÓTESES	15
2.4 PREMISSAS	15
2.5 DELIMITAÇÃO	15
2.6 LIMITAÇÃO	15
2.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	16
3 CINZAS GERADAS NA QUEIMA DO CARVÃO FÓSSIL	18
3.1 ORIGEM DAS CINZAS PESADAS	18
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS PESADAS	19
3.3 CINZAS PESADAS E O IMPACTO AMBIENTAL	23
4 PAVIMENTO RODOVIÁRIO	28
4.1 MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE	29
4.2 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	31
4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	35
4.3.1 Estabilidade Marshall e Fluência	35
4.3.2 Módulo de Resiliência	37
4.3.3 Resistência à Tração (RT)	38
4.4 ANÁLISE MECANÍSTICA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	39
4.4.1 Dimensionamento mecânico	40
4.4.2 Programa Everstress 5.0	42
5 MATERIAIS UTILIZADOS E MÉTODO EXPERIMENTAL	44
5.1 PROJETO EXPERIMENTAL	44
5.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA MISTURA ASFÁLTICA.....	45
5.2.1 Agregados	45
5.2.2 Ligante Asfáltico	46
5.2.3 Cinza Pesada	47
5.3 EXECUÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	50
5.3.1 Moldagem dos corpos-de-prova	50

5.3.2 Estabilidade Marshall e Fluência	54
5.3.3 Resistência à Tração	55
5.3.4 Módulo de Resiliência	56
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	57
6.1 ENSAIOS MECÂNICOS	57
6.1.1 Estabilidades Marshall e Fluências	57
6.1.2 Módulos de Resiliência e Resistências à Tração	61
6.2 ANÁLISE MECANÍSTICA	65
7 CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS.....	70
ANEXO A	72
ANEXO B	75

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos são estruturas de várias camadas e de espessuras limitadas, sendo construídos sobre as superfícies finais de terraplanagem. Têm por finalidade resistir aos esforços que recebem do tráfego de veículos e do clima, fornecendo aos usuários melhores condições de rolamento e segurança, sendo o pavimento asfáltico o tipo mais usado no País.

Pavimentos asfálticos, ou flexíveis, são formados por quatro camadas principais: revestimento, base, sub-base e reforço de subleito. Dependendo do tráfego e da disponibilidade de materiais, a estrutura pode não possuir alguma dessas camadas. A camada de revestimento é constituída por mistura asfáltica, uma combinação de agregados e ligante asfáltico. Essa camada tem por finalidade suportar diretamente às solicitações impostas pelo tráfego e transmitir de forma amenizada às camadas subjacentes, além de funcionar como impermeabilizante do pavimento.

A demanda por materiais para infraestrutura viária é grande e cada vez mais se restringem as jazidas de materiais primários como brita, solo e areia. Estes, por sua vez, estão se tornando mais escassos. Enquanto isso, as termelétricas vêm utilizando carvão para gerar energia e conseqüentemente, gerando resíduos como cinza volante, cinza pesada e escória, que estão sendo depositadas em terrenos ou bacias de decantação.

Cinza pesada é um resíduo constituído por uma mescla de materiais agregados e particulados, silicoaluminosos, de textura areno-siltosa, que são coletadas nos fundos das fornalhas e conduzidas hidraulicamente para locais de depósito. Por ser um resíduo industrial está sujeita a condições e normas específicas para sua disposição no meio ambiente.

Com perspectivas do crescimento da demanda energética no Estado, pressupõe-se um aumento na geração de cinzas pesadas ao longo da próxima década. Devido a esta razão, é responsabilidade dos envolvidos na atividade de geração de energia elétrica, com a queima do carvão fóssil, estabelecer diretrizes para as ações locais em busca de um desenvolvimento sustentável. Por isso se pensa, cada vez mais, em substituir materiais naturais (virgens) por subprodutos ou resíduos de processos industriais, podendo, também, apresentar vantagem econômica.

Diante deste cenário, as cinzas volantes e pesadas estão se tornando materiais promissores para se utilizar em pavimentação, como também na construção civil. Sua utilização em pesquisas de solo estabilizado com cinza e cal, ou como matéria-prima na produção de artefatos de cimento, substituindo tanto o cimento Portland quanto o agregado, estão apresentando resultados satisfatórios.

Desta forma, o trabalho propõe-se a utilizar a cinza pesada nas misturas asfálticas a quente em substituição de uma fração do agregado natural. Serão realizados ensaios para determinação das características mecânicas dessa nova mistura e, para verificação das propriedades necessárias quanto ao funcionamento estrutural e de segurança quando aplicada em camada de pavimentação.

Assim, este trabalho está dividido em sete capítulos, sendo o primeiro aquele que contém esta introdução. O segundo capítulo trata do método de pesquisa, esclarecendo a questão proposta, os objetivos, hipóteses e como ocorreram as etapas do trabalho. Os capítulos três e quatro apresentam uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados, cinzas e pavimentação respectivamente. O capítulo cinco mostra a procedência dos materiais utilizados para ensaios, suas características e bem como os procedimentos de laboratório. O capítulo seis apresenta uma análise dos resultados obtidos nos ensaios e análise mecanística para fazer a avaliação do material estudado. O capítulo sete apresenta a conclusão do trabalho, citando o desempenho do material, sua viabilidade de uso e algumas sugestões de estudos para outras pesquisas.

2 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo engloba o método de pesquisa adotado no trabalho. Nele está apresentada a questão a ser respondida, a descrição dos objetivos estabelecidos, premissas, delimitações e limitações que a pesquisa possui. Também está apresentado o delineamento, mostrando o procedimento a ser seguido durante o estudo.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: há possibilidade de utilização de cinzas pesadas em misturas asfálticas a quente para camadas de revestimento asfáltico?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Para responder a questão de pesquisa, o trabalho, possui um objetivo principal e três secundários. O objetivo principal destina-se ao produto final da pesquisa e os secundários, as etapas pertinentes para o procedimento do trabalho.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a obtenção dos valores de resistência à tração, módulo de resiliência, estabilidade Marshall e fluência de misturas asfálticas a quente que utilizam cinzas pesadas em sua composição, para uso em camada de revestimento asfáltico, fazendo uma análise mecânica e comparando com valores mínimos admissíveis para essa função.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) determinação do teor ótimo de cinza pesada na dosagem das misturas asfálticas;

- b) avaliação das características de periculosidade da cinza pesada;
- c) determinação do comportamento mecânico das misturas asfálticas.

2.3 HIPÓTESE

As misturas asfálticas a quente confeccionadas com cinzas pesadas podem ser utilizadas em camadas de revestimento asfáltico, pois atingem os valores mínimos nos ensaios propostos, comparadas a uma mistura asfáltica a quente convencional, conforme segue:

- a) resistência à tração = 0,64 MPa;
- b) módulo de resiliência = 2100 MPa;
- c) estabilidade Marshall = 350 kgf;
- d) fluência = 20 à 46 (0,1mm).

2.4 PREMISSAS

É importante o aproveitamento de resíduos provenientes da queima de carvão fóssil em camadas de pavimentação por estes estarem sendo depositados em terrenos a céu aberto, causando impacto ambiental negativo.

2.5 DELIMITAÇÃO

O trabalho de pesquisa delimita-se ao uso de cinzas pesadas provenientes dos processos de combustão de carvão pulverizado, em ambiente oxidante e de alta temperatura, coletadas no fundo das fornalhas, da região Carbonífera do Rio Grande do Sul e misturadas ao ligante asfáltico convencional classificado como CAP 50-70 e agregados minerais de basalto para avaliação em misturas asfálticas a quente.

2.6 LIMITAÇÃO

A pesquisa limita-se a avaliação da qualidade das misturas asfálticas a quente, produzidas com cinzas pesadas em camadas de revestimentos asfálticos, utilizando somente os valores de

estabilidade Marshall, fluência, módulo de resiliência e resistência à tração estática, como referência.

2.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O presente trabalho foi dividido em sete etapas, apresentadas a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição das dosagens a serem testados;
- c) definição do programa experimental;
- d) moldagem dos corpos-de-prova;
- e) ensaios de caracterização das misturas (propriedades mecânicas);
- f) análise dos resultados;
- g) conclusões.

A primeira etapa, denominada pesquisa bibliográfica foi direcionada ao estudo das propriedades físicas e químicas das cinzas pesadas geradas na queima do carvão fóssil e a verificação de como este material tem sido utilizado até os dias atuais. Durante esta etapa do trabalho também foi realizado estudo sobre as propriedades das misturas asfálticas a quente para a determinação da dosagem a ser utilizada na confecção dos corpos-de-prova e dos ensaios convencionais para a determinação dos principais parâmetros a serem utilizados no dimensionamento dos pavimentos flexíveis.

Para a realização dos ensaios foram moldados corpos-de-prova pelo método Marshall, para então executar os ensaios para obter a caracterização da mistura, realizados de acordo com as normas do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Os ensaios realizados foram:

- a) estabilidade Marshall (DNER ME 043/95);
- b) módulo de resiliência (DNER ME 133/94);
- c) resistência à tração Estática (DNER ME 138/94);
- d) fluência (DNER ME 043/95).

Após os ensaios terem sido realizados foi necessário fazer a análise dos resultados obtidos, comparando com os parâmetros mínimos para cada ensaio, de acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), se fossem realizados com materiais convencionais. Com todos os resultados analisados, pode ser feita a conclusão do trabalho de diplomação, obtendo um parecer sobre o uso das cinzas pesadas oriundas da queima do carvão fóssil. Em seguida está representado na figura 1 o diagrama do delineamento da pesquisa.

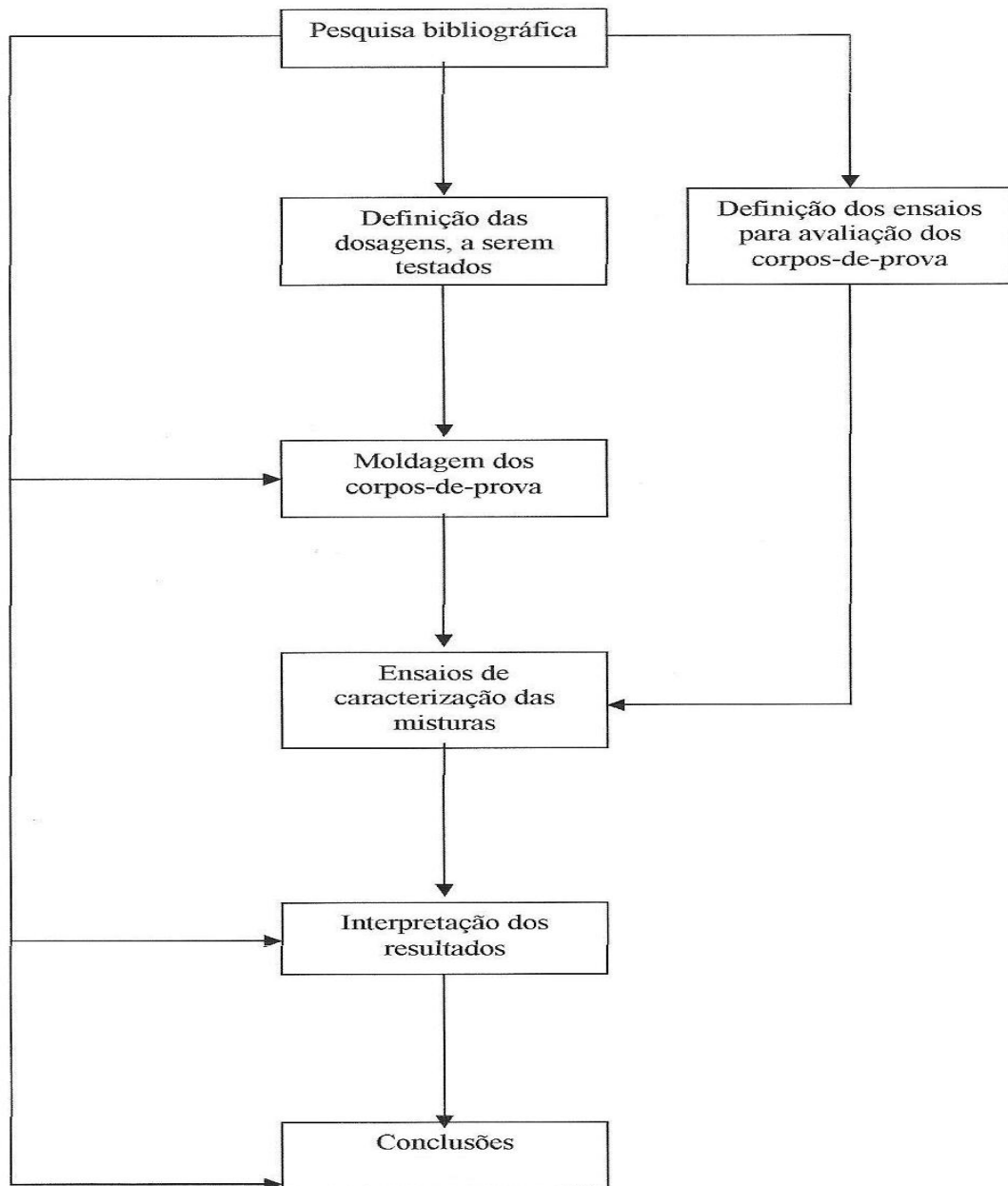


Figura 1: diagrama do delineamento da pesquisa

3 CINZAS GERADAS NA QUEIMA DO CARVÃO FÓSSIL

A preocupação com a possibilidade de esgotamento dos recursos naturais e com os efeitos que a extração de agregados pode causar sobre o meio ambiente tem tornado imperativa a investigação cuidadosa de alternativas aos materiais naturais tradicionalmente empregados na pavimentação de vias. Paralelamente à produção de agregados, grandes quantidades de resíduos e subprodutos são gerados por usinas termelétricas, como é o caso das cinzas originadas na queima do carvão. Neste capítulo serão apresentadas a origem das cinzas pesadas, a caracterização e a classificação deste resíduo.

3.1 ORIGEM DAS CINZAS PESADAS

As usinas termelétricas têm utilizado carvão fóssil para geração de energia elétrica, material que apresenta elevada taxa de matéria mineral em sua composição. Dessa forma, a combustão e gaseificação do carvão formam um resíduo que se chama genericamente de cinza. Segundo Rohde (2006, p. 139), as cinzas podem ser classificadas em três categorias:

- escórias são as cinzas originadas na queima ou gaseificação do carvão granulado em grelhas fixas e móveis. Frequentemente se apresentam com granulometria grosseira e blocos sinterizados, apresentando elevados teores de carbono não queimado (10 a 20%);
- cinzas de fundo são as cinzas mais pesadas e de granulometria mais grossa, que caem para o fundo das fornalhas e gaseificadores, sendo frequentemente retiradas por fluxo de água. Esse tipo de cinza é originado nos processos de queima do carvão em forma pulverizada e da queima ou gaseificação do carvão em leito fluidizado;
- cinzas leves também denominadas cinzas volantes são constituídas de partículas extremamente finas (100% menor que 0,15mm), leves e que são arrastadas pelos gases de combustão de fornalhas ou gases gerados em gaseificadores industriais. As grandes unidades produtoras desse tipo de cinza são as usinas termoelétricas e centrais de vapor.

Atualmente, as cinzas volantes vêm sendo largamente utilizadas em diversas áreas da Engenharia Civil, seja fazendo parte da composição do cimento Portland juntamente com as escórias, ou sendo acrescentadas no solo para estabilização deste. Por outro lado as cinzas pesadas têm sido apenas descartadas a céu aberto, constituindo um risco ambiental e, por isso, comprometendo a instalação de novas unidades geradoras de energia. O quadro 1 apresenta a capacidade máxima de cinzas geradas pelas principais termelétricas da Região Sul do Brasil.

SITUAÇÃO	TERMELÉTRICA	RESÍDUOS (t)		
		CINZA VOLANTE	CINZA PESADA	ESCÓRIA
EM OPERAÇÃO	PRESIDENTE MÉDICI – fases A e B (RS)	1.500.000	375.000	-
	SÃO JERÔNIMO (RS)	5.000	-	50.000
	CHARQUEADAS (RS)	295.058	126.453	-
	JORGE LACERDA I, II, III e IV (SC)	1.500.000	500.000	-
	FIGUEIRA (PR)	50.000	5.000	-
EM CONSTRUÇÃO	PRESIDENTE MÉDICI – fase C (RS)	1.000.000	250.000	-
	JACUÍ (RS)	1.000.000	250.000	-
EM PROJETO	SEIVAL (RS)	1.000.000	250.000	-
	USITESC (SC)	1.500.000	500.000	-
	CT-SUL (RS)	1.200.00	250.000	-

Quadro 1: termelétricas do sul do País que utilizam carvão fóssil como combustível, em operação, construção e projeto: capacidades máximas de produção de cinzas ano (ROHDE, 2006, p. 140)

Como pode ser visto no quadro 1, a geração de resíduos por parte das termelétricas não é um problema passageiro em função das usinas existentes. A geração de cinzas é um problema que irá permanecer por anos, pois além de existirem termelétricas em construção, ainda outras estão em projeto, mostrando que a tendência é aumentar a produção e, conseqüentemente, depósito de cinzas pelo estado.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS PESADAS

Os materiais para serem utilizados na construção civil devem ser devidamente caracterizados. Assim a caracterização das cinzas pesadas é muito importante para conhecer suas propriedades quanto à resistência e deformabilidade. Além disso, é importante analisar se há variações destas propriedades no caso de materiais oriundos de diferentes localidades.

As cinzas pesadas provenientes da Região Carbonífera do Rio Grande do Sul apresentam características químicas muito semelhantes entre si, conforme pode ser visto no quadro 2, mesmo variando a localidade de onde foram extraídas as matérias-primas. Com relação a isto, Zwonok et al. (2006, p. 68), citam que:

Os resultados das análises químicas, em combinação com os resultados das análises mineralógicas, revelam que mais de 90% das cinzas de fundo compreendem compostos químicos e vidros formados de SiO_2 , Al_2O_3 e FeO_3 . A partir destes dados pode-se deduzir que as cinzas de fundo são constituídas predominantemente de silicatos e aluminatos amorfos, com valores de sílica superiores a 60%. Chamam também à atenção os altos teores de ferro, a predominância do cálcio como elemento alcalino-terroso e os baixos teores de carvão não queimado e de enxôfre. Relativamente baixas também são as concentrações em metais alcalinos.

Constituintes Maiores	Usina Termelétrica de Charqueadas, Charqueadas - RS (%)	Aracruz Celulose S.A., Guaíba - RS (%)	Usina Termelétrica Presidente Médici, Candiota - RS (%)
SiO_2	63,30	62,50	66,70
Al_2O_3	24,50	24,60	19,20
Fe_2O_3	4,50	3,90	9,00
TiO_2	0,98	0,98	0,72
CaO	1,31	4,70	0,60
MgO	0,40	0,34	0,30
K_2O	1,60	1,10	1,20
Na_2O	0,14	0,14	0,13
C	3,13	1,47	0,34
S	0,05	0,12	<0,05

Quadro 2: resultados médios das análises elementares das cinzas pesadas
(ZWONOK et al., 2006, p. 69)

Quanto à caracterização física, Zwonok et al. (2006, p. 73) mostram que os resultados das análises granulométricas das cinzas pesadas podem ter consideráveis alterações, dependendo da origem do carvão. Segundo o quadro 3, os grãos predominantes são do tamanho areia e silte em praticamente todas as cinzas e com baixos teores de fração argila, sendo classificados segundo a granulometria, como materiais granulares.

Procedência das cinzas	Diâmetro dos grãos (%)				
	Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa
Usina Termelétrica de Charqueadas, Charqueadas – RS	1	44	41	13	1
Aracruz Celulose S.A., Guaíba – RS	1	29	34	26	10
Presidente Médici, Candiota – RS	1	30	42	20	7

Quadro 3: resultados das análises granulométricas das cinzas pesadas (ZWONOK et al., 2006, p. 73)

Zwonok et al. (2006, p. 73) ainda afirmam que:

Este resíduo mesmo apresentando variações granulométricas dependendo da origem, costuma ser uniforme quanto a sua textura e homogeneidade química na mesma unidade industrial, aumentando a facilidade de usá-las na construção em geral. Por serem praticamente granulares, as cinzas pesadas podem ser consideradas como não plásticas e não coesivas. Também apresentam massas específicas dos grãos muito baixos comparando a dos grãos de solos, isso deve ocorrer a uma provável presença de gases no interior de algumas partículas e agregados. Morfológicamente, as amostras das cinzas de diferentes procedências, mostram-se análogas. As partículas das cinzas de fundo, de uma forma geral, são formadas por aglomerados de grãos esféricos, muitos ocos, por vezes preenchidos por grãos menores de forma também esférica e/ou irregular.

A NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999), que trata de materiais pozolânicos, indica que as cinzas sul-brasileiras podem ser definidas como tais, uma vez que são constituídos por sílica e alumínio. A Norma define como pozolanas os materiais que são, “[...] silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.”. Ainda usando como referência a NBR 12653, as cinzas de fundo estão classificadas como pozolanas artificiais, por serem resíduos que resultam da combustão de carvão fóssil pulverizado ou granulado. Vale ressaltar que na Norma não são mencionadas as cinzas pesadas, mas conforme suas propriedades (quadro 4), pode-se inseri-las na classe E.

Propriedades	Classes de material pozzolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, % mín.	70	70	50
SO_3 , % máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade, % máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, % máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na_2O , % máx.	1,5	1,5	1,5

Quadro 4: exigências químicas para classificação das classes de pozzolâneas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999, p. 3)

A classificação segundo a NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999, p. 2) gera obstáculos para o crescimento do uso deste resíduo do carvão no mercado. Não existe legislação específica para as cinzas. Este material é regulado apenas como resíduos sólidos, o que significa que o seu uso requer uma aprovação específica, caso a caso, e monitoramento ambiental prolongado. A figura 2 apresenta um exemplo de cinza pesada.



Figura 2: cinza pesada gerada na Aracruz – Guaíba/RS

3.3 CINZAS PESADAS E O IMPACTO AMBIENTAL

A origem dos resíduos é um ponto importante para sua utilização na Engenharia Civil, principalmente quando estes são de origem industrial, como é o caso da cinza. Nesta situação é necessário fazer uma avaliação dos impactos ambientais que o uso do resíduo pode gerar, como também dos impactos à saúde humana. De acordo com Zwonok et al. (2006, p. 94),

[...] o carvão sul-brasileiro por apresentar um alto teor em matéria mineral inorgânica tem o seu consumo, como combustível, associado a um grave problema de caráter ambiental que é o da destinação de quantidades significativas de resíduos sólidos, resultantes da conversão do material inorgânico original durante o processo de combustão.

A NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 7), define resíduo sólido como “[...] resíduos nos estados sólidos ou semi-sólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e varrição.”, estando assim as cinzas pesadas dentro desta categoria, por serem sólidas e de origem industrial. A Norma também classifica os resíduos quanto ao seu grau de periculosidade, risco à saúde pública e ao meio ambiente. Esta classificação é realizada de acordo com a identificação do processo que deu origem ao resíduo, listados nos anexos A e B da Norma (os quais não constam neste trabalho), seus constituintes e características, conforme é apresentado no fluxograma da figura 3.

A NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 8), classifica os resíduos quanto ao seu grau de periculosidade, como:

- a) resíduos classe I – perigosos:** são aqueles que apresentam periculosidade. Para isto se leva em consideração as características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;
- b) resíduos classe II – não perigosos,**
 - resíduos classe II A – não inertes: apresentam características com biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - resíduos classe II B – inertes: são aqueles que quando em contato com água, dinâmica ou estática, não tem seus constituintes solubilizados de forma a ultrapassar os limites padrões de potabilidade da água.

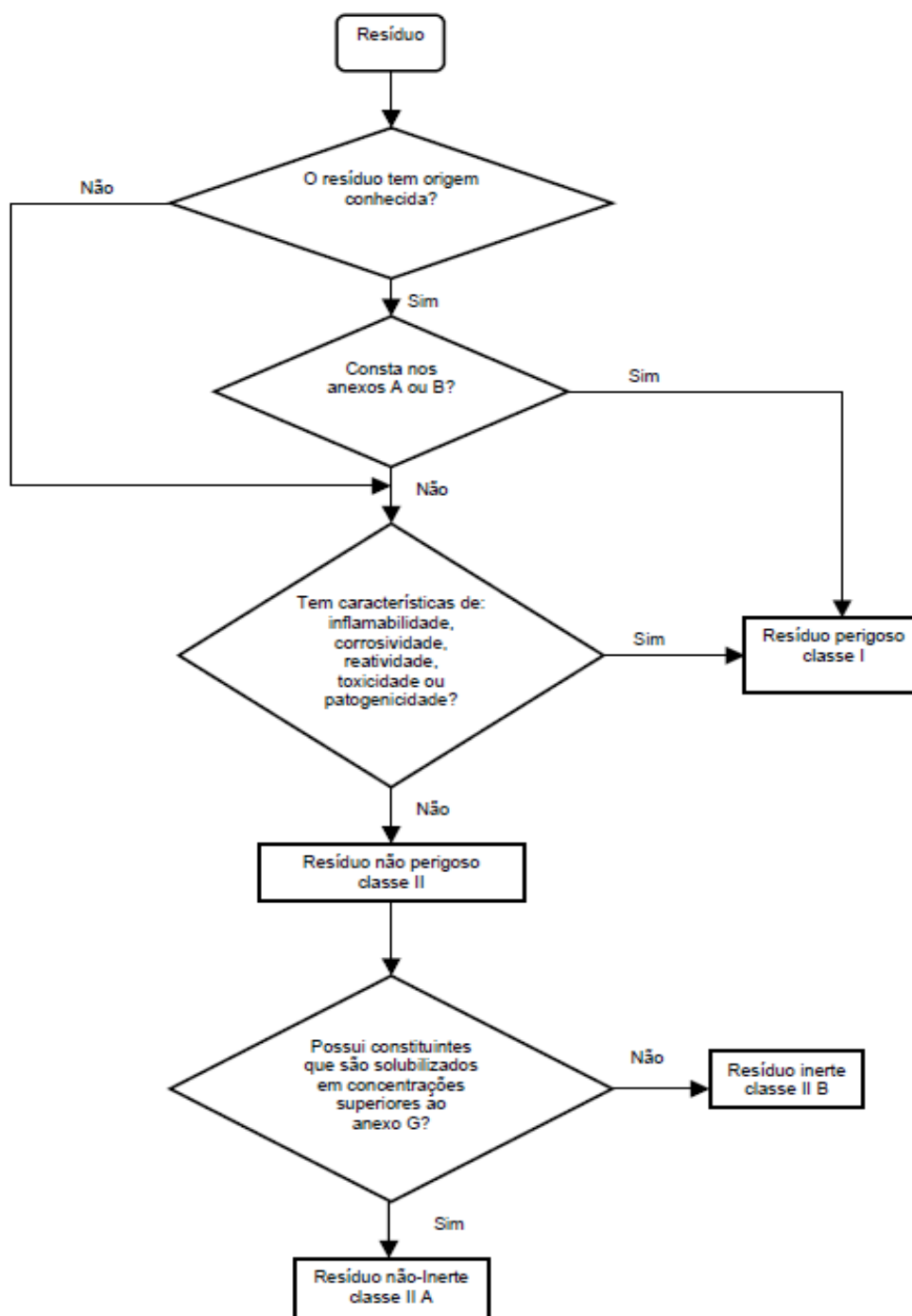


Figura 3: caracterização e classificação de resíduos sólidos conforme NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 6)

Os valores encontrados para as cinzas pesadas nos ensaios de lixiviação, sais solúveis e solubilização, estão apresentados nos quadros 5, 6 e 7, respectivamente. Na lixiviação, as concentrações dos parâmetros inorgânicos foram inferiores aos limites máximos especificados no anexo F da NBR 10004 (que se encontra no anexo A deste trabalho). Dessa forma a cinza

pesada não está incluída no contexto de toxicidade, uma vez que também não apresenta algumas das substâncias descritas pela Norma (ZWONOK et al., 2006, p. 71).

Parâmetros (mg/l)	Limite máximo permitido	Usina Termelétrica de Charqueadas, Charqueadas – RS	Aracruz Celulose S.A., Guaíba - RS	Usina Termelétrica Presidente Médici, Candiota – RS
Fluoreto	150	1,9	0,58	0,54
As	5,0	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Ba	100	< 0,6	< 0,6	< 0,6
Cd	0,5	< 0,007	< 0,007	< 0,007
Pb	5,0	< 0,2	< 0,3	< 0,2
Cr	5,0	< 0,07	< 0,07	< 0,07
Cr ⁺⁶	5,0	-	-	-
Hg	0,1	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007
Ag	5,0	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Se	1,0	< 0,03	< 0,03	< 0,03
PH inicial	-	9,3	9,3	8
PH final	-	4,3	5,2	3,4

Quadro 5: resultados dos ensaios de lixiviação em cinzas pesadas (ZWONOK et al., 2006, p. 71)

Procedência das cinzas	Sais solúveis (%)
Usina Termelétrica de Charqueadas, Charqueadas – RS	0,278
Aracruz Celulose S.A., Guaíba – RS	0,313
Presidente Médici, Candiota – RS	0,045

Quadro 6: resultados de ensaios de sais solúveis nas cinzas pesadas (ZWONOK et al., 2006, p. 71)

Com relação ao resíduo ser corrosivo, o material deve apresentar característica aquosa e pH inferior ou igual a 2 ou superior ou igual a 12,5, o que de acordo com os resultados apresentados no quadros 5 caracteriza o resíduo como corrosivo. Nos ensaios para determinação de sais solúveis os teores foram baixos, ficando abaixo dos valores máximos estabelecidos para uso em artefatos para construção civil (ROHDE, 2006, p. 146).

Os limites dos resíduos inertes e os não inertes, quanto à toxicidade, são estabelecidos pelo ensaio de solubilização. As concentrações dos constituintes avaliados nas cinzas pesadas pela NBR 10004, estão abaixo dos limites máximos permitidos, especificados pelo anexo G da Norma e reproduzidos no anexo B deste trabalho.

Parâmetros (mg/l)	Limite máximo permitido	Usina Termelétrica de Charqueadas, Charqueadas - RS	Aracruz Celulose S.A., Guaíba - RS	Usina Termelétrica Presidente Médici, Candiota - RS
Cloreto	250	0,95	1,8	1,2
Dureza total (CaCO ₃)	500	133,9	156,2	23,7
Fluoreto	1,5	0,84	0,19	0,18
Sulfato	400	117,3	142,7	10
Nitrato (N)	10,0	0,5	< 0,5	< 0,5
Fenol	0,001	n.d.	n.d.	n.d.
Surfactantes (SAAML)	0,2	n.d.	n.d.	n.d.
Cianeto	0,1	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Al	0,2	< 0,5	< 0,5	< 0,5
As	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Ba	1,0	< 0,6	< 0,6	< 0,6
Cd	0,005	< 0,007	< 0,007	< 0,007
Pb	0,05	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Cu	1,0	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Cr	0,05	< 0,07	< 0,07	< 0,07
Fe	0,3	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Mn	0,1	< 0,06	< 0,06	< 0,06
Hg	0,001	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007
Ag	0,05	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Se	0,01	< 0,03	< 0,03	< 0,03
Na	200	1,06	2,4	0,74
Zn	5,0	< 0,008	< 0,008	< 0,008

Quadro 7: resultados dos ensaios de solubilização das cinzas pesadas (ZWONOK et al., 2006, p. 72)

Rohde (2006, p. 148) classifica as cinzas como resíduos classe II A – não inerte, ou seja, para a sua disposição no solo, as cinzas devem necessariamente ser colocadas em um aterro sanitário. No entanto, as cinzas de carvão têm sido dispostas, no sul do Brasil, em terrenos a céu aberto nas cercanias das fontes geradoras, sem nenhum controle ambiental agredindo o meio ambiente, a paisagem natural e os ciclos naturais, conforme mostrado na figura 4. Esse ato só começou a se modificar, a partir da década de 1990, por pressão da sociedade e ações de órgãos ambientais e governamentais. Clarke (1992, p. 27 apud ROHDE 2006, p. 142) comenta que:

[...] é previsível que a legislação para a disposição dos resíduos de carvão se torne mais restritiva. Preocupações ambientais sobre possíveis contaminações de águas subterrâneas de sítios de disposição devem exigir operadores a construir aterros de cinza com impermeabilizações mais espessas, com sistemas de drenagem mais extensivos e com capacidade de monitoramento de longa duração, portanto aumentando o custo deste procedimento. O aumento da oposição da opinião pública contra todo tipo de operação de disposição no solo e a escassez de áreas em alguns sítios de geração fazem a futura deposição inaceitável ou, pelo menos, relativamente custosa. A utilização dos resíduos de carvão se tornará, portanto, cada vez mais importante. É essencial que as estratégias de utilização sejam avaliadas e desenvolvidas agora.



Figura 4: depósito de cinzas a céu aberto e contato com solo (ROHDE, 2006, p. 51)

4 PAVIMENTO RODOVIÁRIO

De acordo com a NBR 7207 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982), pavimento é uma estrutura construída após terraplanagem e destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego e melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança. Também deve resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

A figura 5 apresenta um exemplo da estrutura do pavimento flexível. As camadas que constituem esta estrutura são definidas pela NBR 7207 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982) como sendo:

Subleito é o terreno de fundação do pavimento ou do revestimento.

Sub-base é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplanagem.

Base é uma camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre a qual se constrói um revestimento.

Revestimento é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, que se destina a melhorar as condições do rolamento em relação à segurança e resistir aos esforços horizontais que recebem.

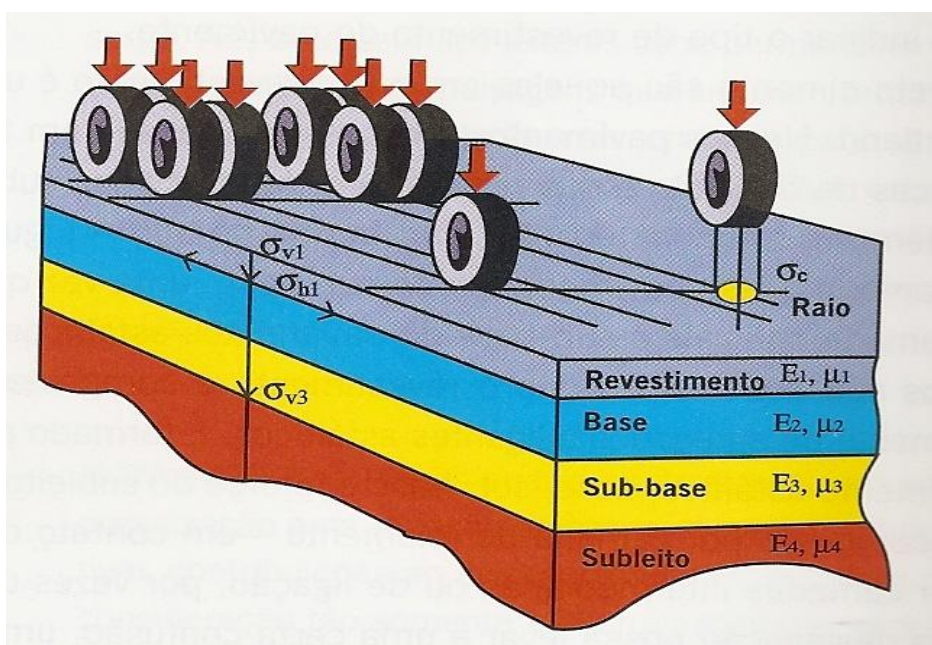


Figura 5: estrutura de um pavimento (BERNUCCI et al., 2008, p. 10)

Os pavimentos podem ser classificados quanto ao comportamento em duas categorias: flexíveis e rígidos. Os **flexíveis** recebem esse nome por se deformarem mais as solicitações que recebem, atenuando sua transmissão às camadas inferiores, devido ao revestimento betuminoso executado sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente. Os **rígidos**, como o próprio nome diz, são menos deformáveis à carga, mas mais resistentes, por serem constituídos por placas de concreto de cimento Portland, as quais são apoiadas sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária (MEDINA; MOTTA, 2005, p. 16).

De acordo com Bernucci et al. (2008, p. 287):

A caracterização de materiais de pavimentação é uma tarefa complexa em virtude das propriedades desses materiais dependerem de diversos fatores, entre eles: meio ambiente, magnitude, tempo de aplicação e frequência das cargas dos veículos, e estado de tensões. No caso das misturas asfálticas, o envelhecimento gradativo devido à oxidação do ligante aumenta a complexidade, já que é difícil a simulação desse fenômeno em laboratório para a devida caracterização do material. Diante disso, a caracterização das misturas requer um balanço apropriado entre rigor e praticidade, uma vez que nem todas as variáveis podem ser consideradas simultaneamente, pelo menos não no estágio atual de conhecimento.

As seções seguintes deste capítulo tratam especificamente da camada de revestimento flexível (ou revestimento asfáltico) em misturas asfálticas a quente. Também são abordados os processos adotados para ensaios e caracterização mecânica das misturas asfálticas, como a dosagem adotada para a moldagem dos corpos-de-prova utilizados neste estudo.

4.1 MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

A camada de revestimento é destinada a receber a carga dos veículos, a ação climática e deve resistir às solicitações impostas pelo rolamento. Além disto, deve ser sempre que possível, impermeável e assegurar uma melhor condição ao rolamento, tanto com relação a segurança como ao conforto. Segundo Pinto (1991, p. 104):

As misturas asfálticas são frequentemente utilizadas nos pavimentos como camadas de revestimento, e que os mais severos defeitos que podem aparecer nas estruturas dos pavimentos flexíveis, se refletem no revestimento, permitindo identificar dois distintos modos de solicitação mecânica: flexão repetida, responsável pela fadiga do material e que está associada ao trincamento do revestimento ou de camadas cimentadas, e a compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanente.

O concreto asfáltico é uma mistura asfáltica usinada a quente constituída basicamente por agregados minerais, de granulometria conhecida e de um ligante asfáltico. O asfalto é um dos principais materiais utilizados como ligantes por proporcionar uma grande união com os agregados e permitir flexibilidade controlável. No geral, o asfalto pode ser definido como “[...] mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção.” (BERNUCCI et al., 2008, p. 25).

As propriedades importantes dos ligantes asfálticos dizem respeito à sua adesividade, impermeabilização, durabilidade e versatilidade de utilização. Seu comportamento tensão x deformação é dependente do tempo de aplicação de carga e é fundamentalmente termoplásticos, o que significa uma consistência que varia com a temperatura. Já a durabilidade diz respeito a capacidade de resistir as mudanças de suas propriedades devido ao intemperismo nas pistas e também devido ao aquecimento, sendo normalmente caracterizada pela manutenção das qualidades coesivas, plásticas e pela resistência ao endurecimento com o tempo (CARDOSO, 2002, p. 20).

Com relação aos agregados, sendo este termo aplicado às areias, pedregulhos, pedras britadas e resíduos, quando em conjunto com o ligante, ajudam a tornar as estruturas mais duráveis em sua vida de serviço. Para isso é importante considerar o formato e origem do material, pois estes devem apresentar propriedades para que suportem as tensões impostas pelo tráfego (BERNUCCI et al., 2008, p. 115).

Diversos fatores afetam o desempenho de uma mistura asfáltica, como o projeto da mistura, as práticas construtivas adotadas, as propriedades dos materiais e mesmo o uso de aditivos para alterar o comportamento da mistura. Importante ressaltar que para se obter um bom desempenho das estruturas de pavimentos, as misturas devem apresentar: capacidade para distribuir tensões, estabilidade para resistir as deformações permanentes, resistência ao trincamento e resistência aos efeitos causados pelas condições climáticas.

A mistura asfáltica a quente, de acordo a Norma DNIT-ES 031 (BRASIL, 2006, p. 3), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), é “[...] executada em usina apropriada, com características específicas, compostas de agregado mineral graduado, material de enchimento (*filler*) e ligante betuminoso espalhada e comprimida a quente.”. Esse tipo de revestimento ainda é o mais usado no Brasil devido ao preço, a impermeabilidade do

ligante, a possibilidade de se trabalhar a diversas temperaturas, a durabilidade das misturas asfálticas e a adesividade do ligante aos agregados.

4.2 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A análise das misturas asfálticas é um trabalho complexo, pois envolve a caracterização de todos os materiais envolvidos, ligante, agregados e aditivos. Além de estudar o comportamento individual destes materiais, deve-se analisá-los em conjunto, pois estes podem apresentar diferenças a pequenas variações na composição. A aplicação destas misturas em revestimentos asfálticos deve ser precedida por ensaios que permitam a obtenção do teor (ou quantidade) de ligante a ser utilizado na mistura.

O teor de ligante asfáltico de projeto varia de acordo com o método de dosagem, e o mais usado no País faz uso da compactação por impacto e é denominado método Marshall. O procedimento Marshall prevê a dosagem de misturas asfálticas considerando valores admissíveis empíricos para estabilidade e a fluência. Leva em consideração a granulometria, densidade dos materiais e a porcentagem de vazios (ROHDE, 2007, p. 57).

O método pode sofrer algumas alterações devido aos equipamentos utilizados e a forma de desmoldar os CP. A seguir segue, passo-a-passo, o procedimento de determinação dos parâmetros gerados numa dosagem Marshall para camada asfáltica e de confecção dos corpos-de-prova, conforme apresentado por Bernucci et al. (2008, p. 218):

1. Determinação das massas específicas reais do cimento asfáltico de petróleo (CAP) e dos agregados.
2. Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada de acordo com a mistura asfáltica.
3. Escolha da composição dos agregados, de forma a enquadrar a sua mistura nos limites da faixa granulométrica escolhida [...] [quadro 8]. Ou seja, é escolhido o percentual em massa de cada agregado para formar a mistura. Nesta etapa ainda não é considerado o teor de asfalto [...].

Um exemplo de composição dos agregados é apresentado no quadro 8, no qual a granulometria destes materiais enquadram-se na Faixa C do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT). Após a escolha da faixa granulométrica, passa-se a moldagem dos corpos-de-prova, conforme segue (BERNUCCI et al., 2008, p. 219):

4. Escolha das temperaturas de mistura e de compactação, a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido [...]. A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150SSF (segundos Saybolt-Furol), de preferência entre 75 e 95SSF ou 0,17+/-0,02Pa.s se medida com o viscosímetro rotacional. A temperatura do ligante não deve ser inferior a 107°C nem superior a 177°C. A temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15°C acima da temperatura definida para o ligante, sem ultrapassar 177°C. A temperatura de compactação deve ser tal que o ligante apresente viscosidades na faixa de 125 a 155SSF ou 0,28+/-0,03Pa.s.

5. Adoção de teores de asfalto para os diferentes grupos de CP a serem moldados. Cada grupo deve ter no mínimo 3 CP. Conforme a experiência do projetista, para a granulometria selecionada, é sugerido um teor de asfalto (T, em %) para o primeiro grupo de CP. Os outros grupos terão teores de asfalto acima (T+0,5% e T+1,0%) e abaixo (T-0,5% e T-1,0%). [...].

6. Após o resfriamento e a desmoldagem dos corpos-de-prova, obtêm-se as dimensões do mesmo (diâmetro e altura). Determinam-se para cada corpo-de-prova suas massas seca (M_s) e submersa em água (M_{sub}). Com estes valores é possível obter a massa específica aparente dos corpos-de-prova (Gmb), que, por comparação com as massas específicas máxima teórica (DMT), vai permitir obter as relações volumétricas típicas da dosagem.

7. A partir do teor de asfalto do grupo de CPs em questão (%a), ajusta-se o percentual em massa de cada agregado, ou seja, $\%n = \%n \times (100\% - \%a)$, onde $\%n$ é o percentual em massa do agregado "n" na mistura asfáltica já contendo o asfalto. Note-se que enquanto $\sum \%n^* = 100\%$, após o ajuste, $\sum \%n = 100\% - \%a$, [...].

Peneira	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-pedra	Areia de campo	Fíler	Faixa de projeto			Faixa C	
	25%	36%	20%	18%	1%	% mín.	% alvo	% máx.	% mín.	% máx.
¾"	100	100	100	100	100		100,0			100
½"	72	100	100	100	100	86	93,1	100	80	100
3/8"	33	98	100	100	100	76	82,6	90	70	90
Nº 4	5	30	98	100	100	46	50,6	56	44	72
Nº 10	3	6	82	99	100	33	38,0	43	22	50
Nº 40	2	2	39	68	100	17	22,2	27	8	26
Nº 80	1	1	21	41	100	10	13,1	16	4	16
Nº 200	0	1	10	21	95	5	7,1	10	2	10

Quadro 8: exemplo da composição dos agregados (percentual passante na peneira) (BERNUCCI et al., 2008, p. 18)

Com os CP moldados obtêm-se os parâmetros importantes para as mistura asfáltica a quente, como por exemplo, o volume de vazios, que para camadas de rolamento em concreto

asfáltico, deve corresponder a 4%. Os CP são levados a prensa Marshall para determinação da estabilidade e a fluência, que são características utilizadas para avaliar a qualidade da mistura. As fórmulas apresentadas na sequência mostram os parâmetros de dosagem e volumétricos obtidos dos CP e a figura 6 apresenta o processo de mistura dos agregados e ligante, como também a compactação do CP (BERNUCCI et al., 2008, p. 222):

$$V = M_s - M_{Ssub} \quad (\text{fórmula 1})$$

$$Gmb = \frac{M_s}{V} \quad (\text{fórmula 2})$$

$$V_v = \frac{DMT - Gmb}{DMT} \quad (\text{fórmula 3})$$

$$VCB = \frac{Gmb \times \%a}{Ga} \quad (\text{fórmula 4})$$

$$VAM = V_v + VCB \quad (\text{fórmula 5})$$

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

V: volume dos corpos-de-prova (cm³);

Gmb: massa específica aparente da mistura (g/cm³);

DMT: massa específica máxima teórica (g/cm³);

M_{Ssub}: massa submersa em água (g);

M_S: massa seca (g);

%a: teor de asfalto do grupo de CP (%);

Ga: massa específica do ligante (g/cm^3);

Vv: volume de vazios (%);

VCB: vazios com betume (%);

VAM: vazios do agregado mineral (%);

RBV: relação betume/vazios (%).

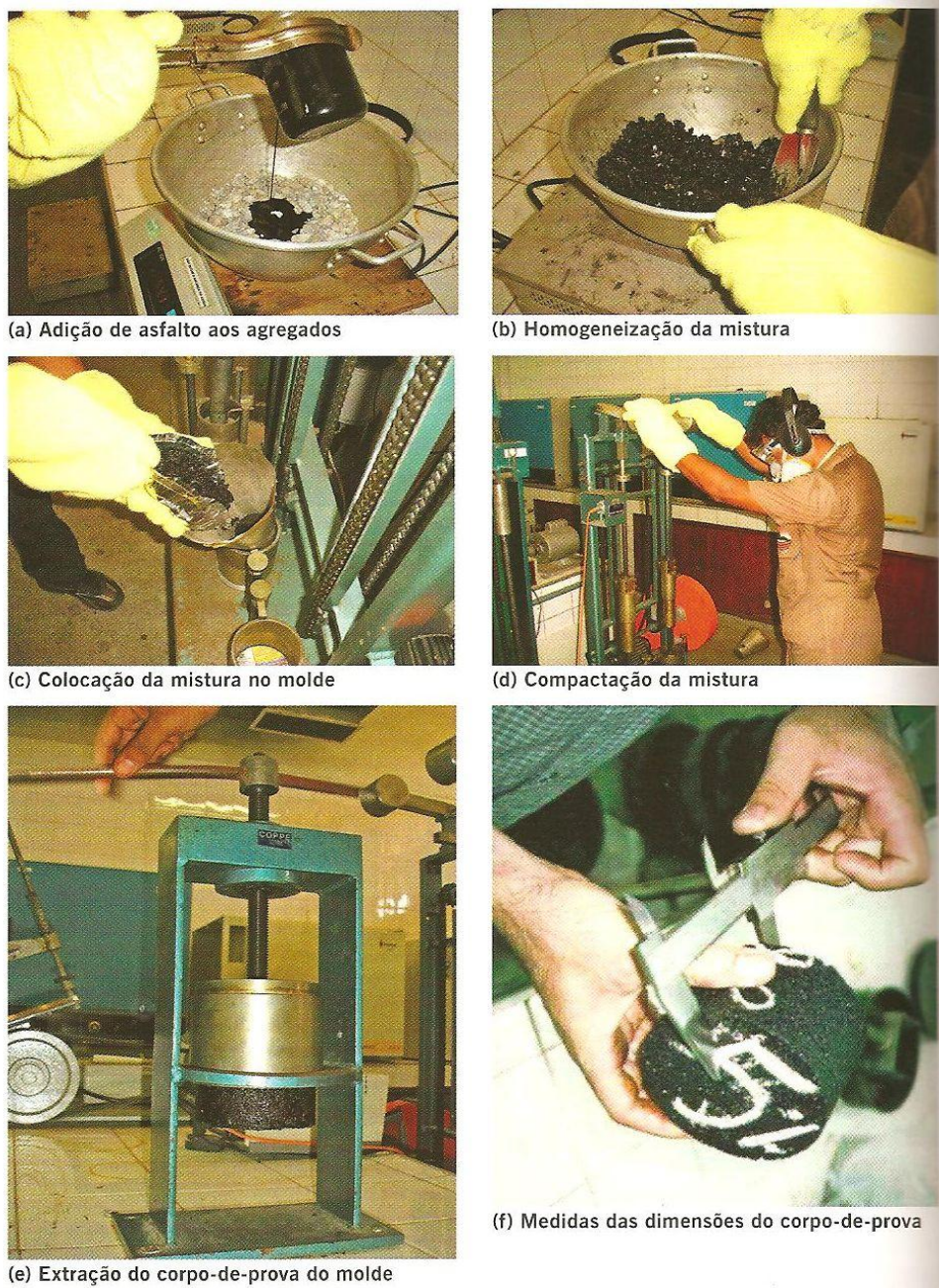


Figura 6: etapas do processo de moldagem (BERNUCCI et al., 2008, p. 220)

De acordo com a NBR 12891 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993, p. 3), para a compactação dos corpos-de-prova segundo o procedimento Marshall deve-se levar em conta a pressão de pneu que a mistura receberia. Essa consideração é feita com o número de golpes por face, sendo 50 golpes para pressão de até 0,69 MPa (7 kgf/cm²) ou 75 golpes para pressão de 0,69 MPa a 1,38 MPa (7 a 14 kgf/cm²). Isso porque, admite-se que a distribuição de tensões no pavimento é igual a pressão de inflação do pneu.

4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Os ensaios de caracterização das misturas asfálticas proporcionam um entendimento do comportamento dos materiais presentes na mistura. Os parâmetros obtidos ajudam a dimensionar os pavimentos e a evitar o surgimento precoce de defeitos, como trincas por fadiga e deformações excessivas. Pinto (1991, p. 104), observa que:

O trincamento é o início de uma fase de deterioração estrutural que modifica o estado de tensões e de deformações do sistema estratificado e, assim seu desempenho. Por essa razão, é importante conhecer as características de ruptura dos materiais envolvidos na construção dos pavimentos, tendo em vista que o comportamento dos revestimentos sob solicitações à flexão e à compressão é caracterizado por Leis Fenomenológicas específicas: lei de fadiga e lei de deformação permanente. Essas constituem as leis de comportamento mecânico intrínseco que devem ser abordadas em um projeto estrutural de pavimentos.

Esses critérios podem ser estabelecidos a partir de valores limites de resistência dos materiais, sendo obtidos em ensaios de laboratório, conforme as recomendações do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). A seguir serão apresentados os ensaios mais usuais para caracterizar o comportamento mecânico das misturas asfálticas a quente.

4.3.1 Estabilidade Marshall e Fluência

A estabilidade Marshall é a resistência máxima à compressão radial apresentada pelo corpo-de-prova e a fluência é a deformação total apresentada, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima. Ambos os valores são obtidos no mesmo ensaio, ocorrendo simultaneamente, e para a confiabilidade dos resultados deve-se seguir o procedimento apresentado pelo DNER-ME 043 (BRASIL, 1995, p. 2).

O ensaio inicia com a imersão dos CP em banho-maria, em torno de 60°C para cimento asfáltico, por cerca de 40 minutos. Após este aquecimento, o CP é colocado no molde de compressão, que deve estar aquecido e limpo, para então se posicionar na prensa e ajustar o medidor de fluência (defletômetro).

Estando o CP posicionado e o equipamento configurado, a prensa é operada de forma que seu êmbolo se eleve a uma velocidade constante até o rompimento do CP, que é observado no defletômetro pela indicação de um máximo. A carga na qual ocorre o rompimento é anotada como sendo a **estabilidade lida** e este valor deve ser corrigido para espessura dos CP ensaiados, multiplicando-se a estabilidade lida por um fator dado pela fórmula 7. O resultado assim obtido é o valor da estabilidade Marshall.

$$f = 927,23h^{-1,64} \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

f: fator;

h: espessura do corpo-de-prova (cm).

O espaço de tempo entre a retirada do corpo-de-prova do banho-maria e o seu rompimento não deve exceder de 30 segundos. De acordo com o DNER-ME 043 (BRASIL, 1995, p. 5), para se ter o valor da fluência, durante a aplicação da carga, a luva-guia do medidor de fluência será firmada, com a mão, contra o topo do segmento superior do molde de compressão, diretamente sobre um dos pinos-guia. A pressão da mão sobre a luva do medidor de fluência deve ser relaxada, no momento em que se der o rompimento do corpo-de-prova, ocasião em que será lido e anotado o valor da fluência. A fluência também pode ser obtida por um defletômetro, um dispositivo que mede deslocamentos providos de arrasto e com sensibilidade de 0,25 mm.

4.3.2 Módulo de Resiliência

Módulo de resiliência (MR) é a relação entre a tensão de tração, aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica (corpo-de-prova Marshall) de uma mistura asfáltica e a deformação específica recuperável, uma energia armazenada no corpo deformado elasticamente e devolvida quando terminado a aplicação da tensão correspondente, numa certa temperatura (BERNUCCI et al., 2008, p. 301).

A Norma DNER-ME 133 (BRASIL, 1994a, p. 3) apresenta o procedimento padrão a se seguir para obtenção do valor do módulo, onde primeiramente, se posiciona o corpo-de-prova no equipamento, conforme pode ser visto na figura 7, e em seguida são aplicadas cargas verticais em ciclos numa frequência de 60 ciclos por minuto. No primeiro momento se realiza o condicionamento do CP, com cargas baixas, por cerca de 200 ciclos. A leitura das deformações é feita através de um oscilógrafo junto ao CP. Após este condicionamento é realizado outras leituras em 300, 400 e 500 ciclos. Com os valores obtidos no oscilógrafo, pode-se calcular o módulo de resiliência através da fórmula 8:

$$MR = \left(\frac{F}{\Delta \times H} \right) 0,9976\mu + 0,2602 \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

MR: módulo de resiliência (kgf/cm²);

F: carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova (kgf);

Δ : deformação elástica ou resiliente registrada no oscilógrafo, para 300, 400 e 500 aplicações da carga (F) (cm);

H: altura do corpo-de-prova (cm);

μ : coeficiente de Poisson (recomenda-se valor de 0,30).

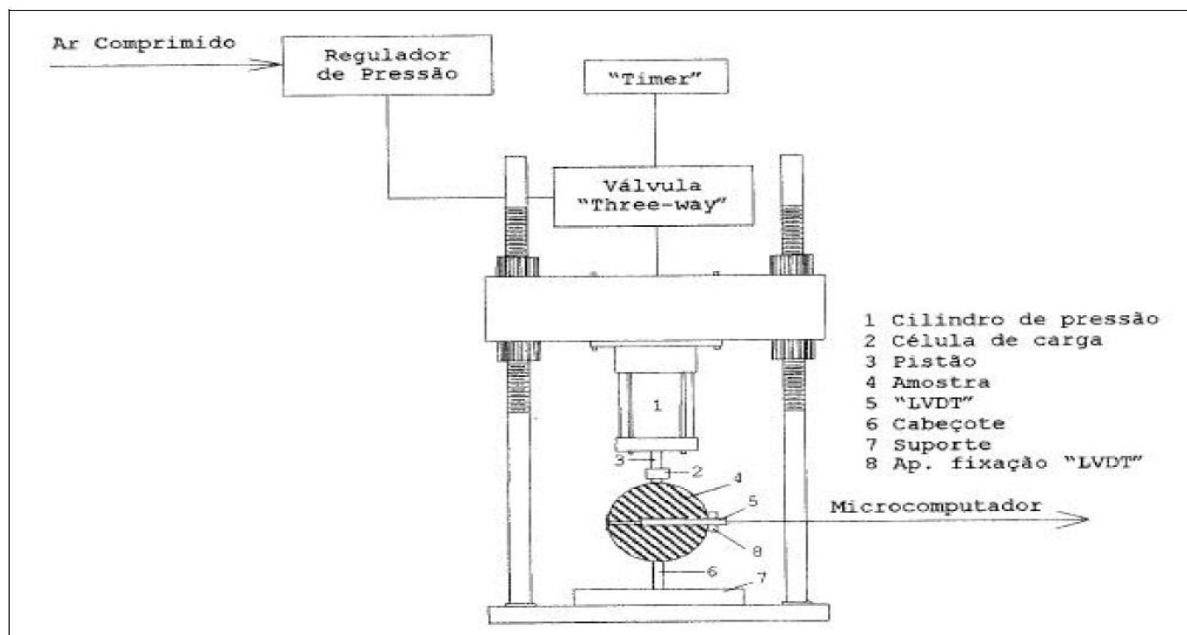


Figura 7: esquema do equipamento de módulo de resiliência (CARDOSO, 2002, p. 100)

4.3.3 Resistência à tração (RT)

Devido à dificuldade de se obter a RT diretamente, diversos métodos indiretos têm sido desenvolvidos para sua determinação. No Brasil, o ensaio de compressão diametral desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro é o mais utilizado.

Bernucci et al. (2008, p. 308) comentam que, “A configuração do ensaio de tração considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro [...]”. É importante ressaltar que a medida que as misturas asfálticas envelhecem em pista, a resistência à tração aumenta, mas em compensação se perde flexibilidade.

A Norma DNER-ME 138 (BRASIL, 1994b, p. 2) apresenta o procedimento adequado para a realização do ensaio de tração em misturas asfálticas, que são realizados com os corpos-de-prova moldados conforme o procedimento Marshall. Para iniciar o ensaio, os CP devem estar na temperatura especificada para o procedimento e em seguida posicionados na horizontal no prato inferior da prensa, onde é verificada a retlineidade do CP.

O CP é fixado na posição com uma leve compressão da prensa, para então se dar início a aplicação da carga progressivamente até sua ruptura, que pode ser observada pela separação das duas metades do corpo-de-prova. Registrada a carga de ruptura no ensaio, o valor da resistência à tração é calculado a partir da fórmula 9:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

σ_R : resistência à tração (kgf/cm²);

F: carga de ruptura (kgf);

D: diâmetro do corpo-de-prova (cm);

H: altura do corpo-de-prova (cm).

4.4 ANÁLISE MECANÍSTICA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Existem diversos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Dentre eles o mais usual é o sugerido pelo DNER, que tem como base os ensaios de Índice Suporte Califórnia (ISC) e nas curvas de dimensionamento do Corpo de Engenheiros Militares dos EUA. Mas tal método está se tornando ultrapassado, devido sua natureza empírica de dimensionamento. Assim, o uso de métodos mecanísticos, que utilizam os conceitos da mecânica dos pavimentos, está aumentando no mundo. Métodos estes que utilizam ferramentas da análise estrutural no cálculo de tensões e deformações, determinando mecanismos de fadiga e de deformabilidade (MEDINA; MOTTA, 2005, p. 352).

4.4.1 DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO

Os dimensionamentos de pavimentos novos através de métodos mecânicos devem levar em consideração fatores ambientais, tráfego, materiais e técnicas construtivas. Para isso os métodos e técnicas adotadas levam em consideração o número de solicitações do eixo padrão (N), para que não ocorra degradação excedente no trecho em análise até que se atinja o N de projeto. Esta avaliação, segundo os procedimentos mecânicos, consiste em se testar a estrutura proposta segundo as premissas de tensões atuantes e deformações ocorridas a partir da relação entre as duas, com base na teoria de elasticidade, chegando-se assim a melhor configuração estrutural possível, ou seja, definindo-se as camadas e as espessuras que irão compor o pavimento em projeto (MEDINA; MOTTA, 2005, p. 362).

A análise é realizada mediante o equilíbrio entre os esforços (tensões e deformações) que a ela são impostos pelas cargas de tráfego e a capacidade resistente dos materiais que a constituem (fadiga e deformação permanente). O fluxograma da figura 8 mostra os caminhos percorridos para o dimensionamento mecânico de pavimentos.

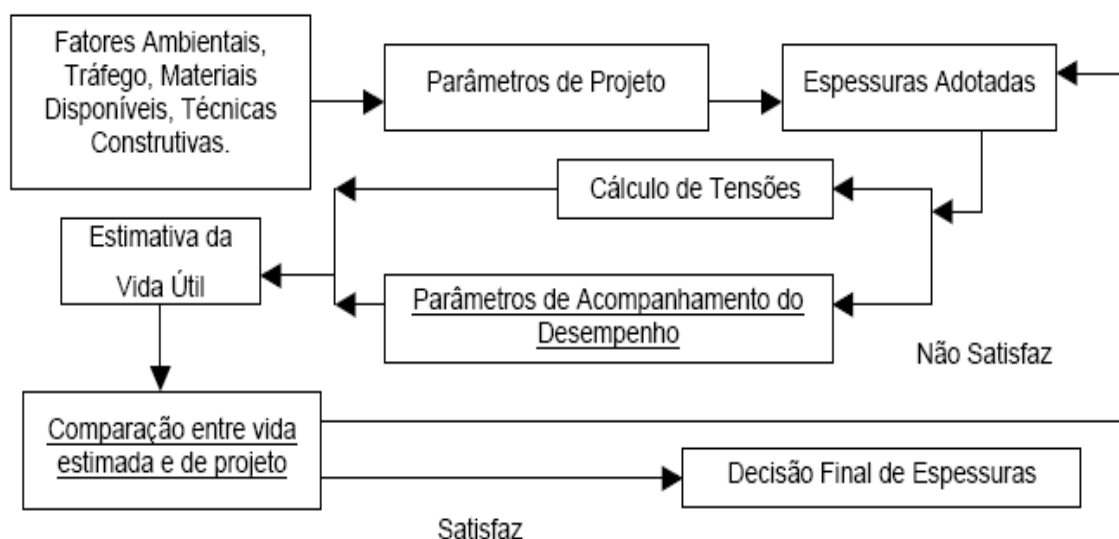


Figura 8: fluxograma de um dimensionamento mecânico de pavimentos (MEDINA; MOTTA, 2005, p. 363)

Com relação às tensões, Medina e Motta (2005, p. 364) citam que, “Os métodos de cálculo consideram dois tipos de comportamento tensão-deformação: elástico-linear e elástico-não

linear.”. As tensões são oriundas do tráfego e a carga imposta à estrutura a partir da repetição do eixo de veículo padrão de 8,2 t.

Refere-se ao comportamento elástico-linear, que o valor do módulo de resiliência deste material não apresenta variação ao longo de toda a sua altura na camada, com o estado de tensões a que o mesmo está submetido. Com relação ao comportamento elástico-não linear, que o valor do módulo de resiliência deste material pode não ser constante ao longo de toda a sua altura, sendo então dependente do estado de tensões a que o mesmo está submetido.

Existem vários modelos para determinação do número de repetições de eixo padrão que leva à ruptura por fadiga na porção inferior da camada do revestimento, um exemplo de modelo de fadiga foi desenvolvido por Pinto (1991) para misturas asfálticas brasileiras, utilizando tensões que esta suportando ou deformações de tração, e módulo de resiliência da camada asfáltica.

Os modelos de fadiga necessitam ser calibrados de forma a corrigir os valores determinados em laboratório, que são obtidos em condições específicas, tais como: carregamento e frequência de carregamento constantes, temperatura fixa, forma e tipo de compactação, diferentes das condições esperadas no campo. Para o cálculo da vida de fadiga do pavimento, Pinto (1991, pág. 152) propõe um modelo que utiliza o valor dos módulos de resiliência obtidos nos ensaios mecânicos e a deformação de tração estimada, como mostra fórmula 10. Para transformar o valor obtido em laboratório a forma mais usual é a aplicação de um fator campo/ laboratório, conforme apresentado na fórmula 11:

$$N_{lab} = 9,07 \times 10^{-9} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{2,65} \left(\frac{1}{MR} \right)^{-0,033} \quad (\text{fórmula 10})$$

$$N_c = f \cdot N_{lab} \quad (\text{fórmula 11})$$

Onde:

N_c : número de repetição de carga para atingir o trincamento por fadiga no campo;

N_{lab} : número de aplicações do carregamento;

f: fator campo/ laboratório (10^4 a 10^5);

ϵ_i : deformação específica de tração (10^{-6} mm);

MR: módulo de resiliência da mistura asfáltica (MPa).

A partir destes modelos de comportamento foram desenvolvidos vários sistemas computacionais que permitem o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos. Estes sistemas tiveram sua formulação matemática fundamentalmente apoiada na teoria da elasticidade, que é usada na mecânica dos pavimentos.

4.4.2 PROGRAMA EVERSTRESS 5.0

O Everstress 5.0 é um programa livre, disponível na internet e desenvolvido pelo Departamento de Transportes do Estado de Washington (WSDOT), nos Estados Unidos, cuja tela inicial do programa é apresentada na figura 9. Este programa usa como dados de entrada valores de módulo de resiliência das camadas asfálticas, modelos elásticos não-lineares para as camadas coesivas ou granulares, coeficientes de Poisson, espessura das camadas, pressão dos pneus, carga aplicada e ponto de aplicação das cargas (WASHINGTON STATE, 2010).

O programa analisa no máximo 5 camadas que podem ser solicitadas por até 20 cargas e está limitada a 20 pontos do pavimento. O programa calcula as tensões, deformações e deslocamentos provocados pela carga atuante no ponto de aplicação considerado, fazendo a diferenciação de materiais granulares dos coesivos e utilizando parâmetros do comportamento resiliente do material obtidos por modelos diversos (WASHINGTON STATE, 2010).

A figura 10 apresenta a distribuição das tensões analisadas pelo programa. No caso do Everstress 5.0, as tensões e deformações de tração ocorrem nos eixos x e y, sendo adotada para os cálculos o maior valor dentre elas. Já as tensões e deformações verticais estão apresentadas no eixo z.

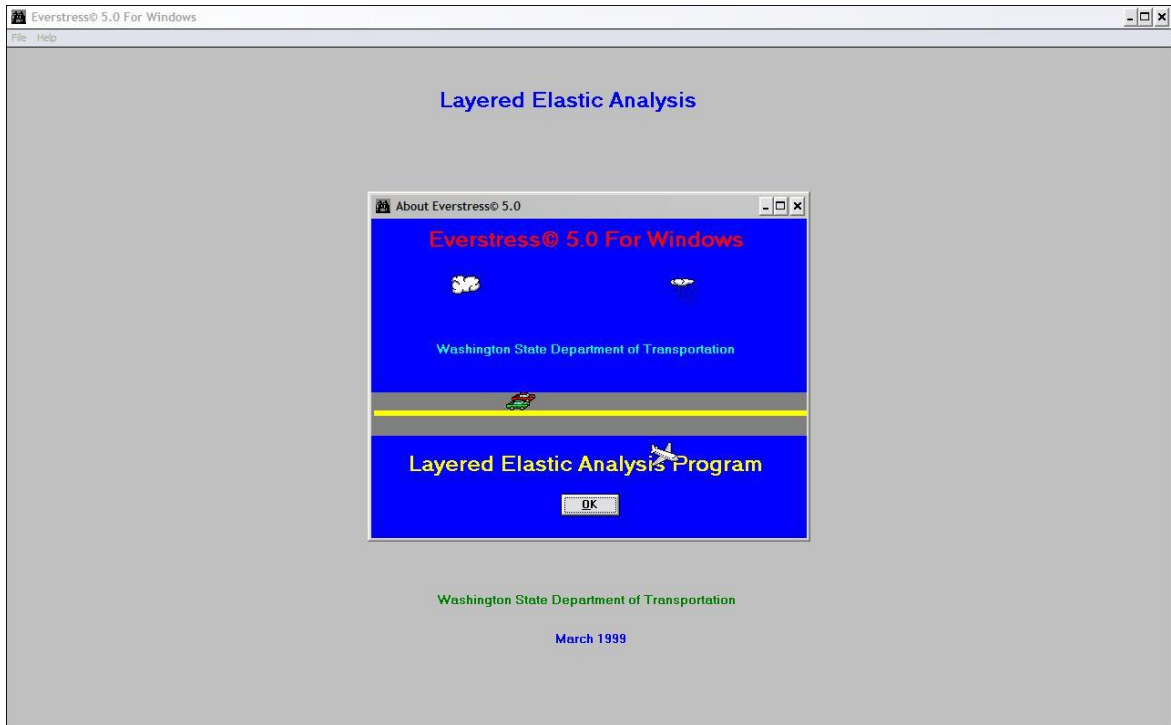


Figura 9: tela inicial do Everstress 5.0

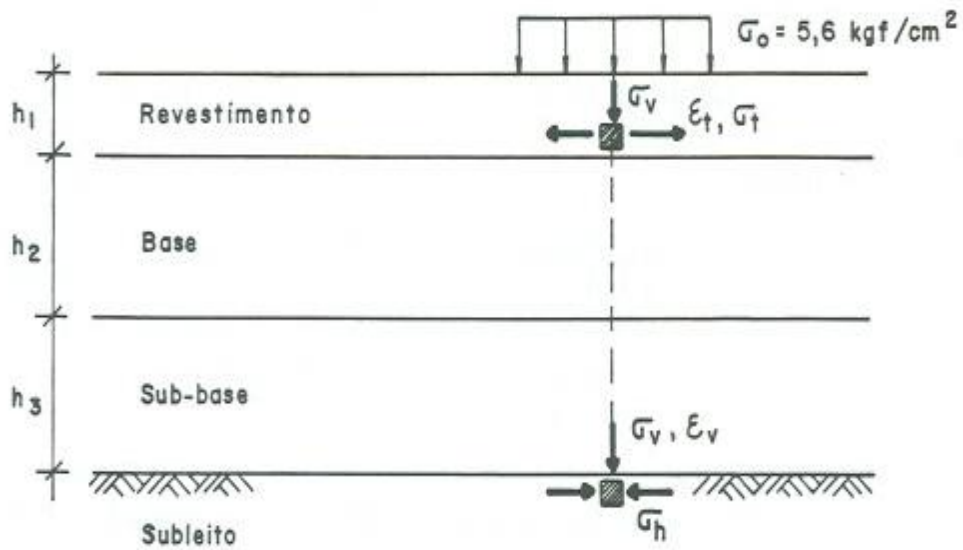


Figura 10: tensões aplicadas na estrutura do pavimento

5 MATERIAIS UTILIZADOS E MÉTODO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados para compor a mistura asfáltica em estudo e os ensaios realizados. Não serão descritos os ensaios de forma detalhada, pois o procedimento completo encontra-se nas normas citadas e em parte no capítulo destinado a revisão bibliográfica, sendo então descritos somente, a sequência e alguns procedimentos específicos adotados para o trabalho.

5.1 PROJETO EXPERIMENTAL

O projeto experimental constituiu em moldar corpos-de-prova de mistura asfáltica com cinza pesada na substituição de parte do agregado com granulometria correspondente. Para essa substituição foram testados dois percentuais de cinza pesada, 6% e 10%, dos quais foram moldados alterando o teor de ligante.

O percentual de 6% de cinza pesada substituiu parte da porção de areia que compõe a mistura asfáltica e o percentual de 10% substituiu a totalidade dessa parcela de agregado de uma mistura asfáltica convencional, da faixa C do DNIT. A granulometria da areia correspondente a fração miúda da constituição da mistura, responsável por dar maior estabilidade e preencher os vazios. O quadro 9 apresenta a identificação dos CP, os teores de ligante, os percentagem de cinza pesada e a quantidade de CP moldados para cada ensaio.

Misturas	% cinza pesada	% ligante	Nº CP MR	Nº CP RT	Nº CP Marshall
6% C + 5,5% L	6	5,5	3	3	2
6% C + 6,0% L		6,0	3	3	2
6% C + 6,5% L		6,5	3	3	2
10% C + 5,5% L	10	5,5	3	3	2
10% C + 6,0% L		6,0	3	3	2
10% C + 6,5% L		6,5	3	3	2
Convencional	0	5	3	3	2

Quadro 9: composição do projeto experimental

5.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA MISTURA ASFÁLTICA

Nesta etapa do trabalho estão apresentados os materiais utilizados para a moldagem dos corpos-de-prova no projeto experimental, mostrando sua granulometria e características. Os materiais estão separados em agregados graúdos e miúdo, ligante asfáltico utilizado e a cinza pesada.

5.2.1 Agregados

O material pétreo e a areia usados para a confecção dos corpos-de-prova de mistura asfáltica é de basalto, proveniente da jazida localizada em Santo Antônio da Patrulha, no Rio Grande do Sul (RS). A areia utilizada é obtida na região de Porto Alegre. As características dos materiais estão apresentados nos quadros 10 e 11.

Peneiras		Passante (%)			
		Jazida Santo Antônio da Patrulha			Porto Alegre
n°	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-pedra	Areia"
3/4	19,1	100	100	100	100
1/2	12,7	47,9	100	100	100
3/8	9,5	13,4	99,6	100	100
4	4,76	0,3	6,8	92,8	100
10	2,00	0,1	0,7	65,8	97,7
40	0,42	0,1	0,7	33,8	58,0
80	0,18	0,1	0,7	26,8	12,0
200	0,074	0,1	0,6	18,9	0,7

Quadro 10: distribuição granulométrica dos agregados (ROHDE, 2007, p. 124)

Propriedade	Santo Antônio da Patrulha
Índice de lamelaridade (%)	30
Absorção (%)	0,79
Massa específica real (kN/m ³)	28,03
Massa específica Aparente (kN/m ³)	27,42
Massa específica Efetiva (kN/m ³)	27,73
Sanidade	6,7
Perda por abrasão (%)	16

Quadro 11: características dos agregados utilizados na mistura asfáltica (ROHDE, 2007, p. 124)

5.2.2 Ligante Asfáltico

O ligante utilizado para compor as misturas asfálticas foi o Cimento Asfáltico do Petróleo (CAP). Estes constituem cerca 25% a 40% do petróleo e correspondem a 1,5% do volume total de petróleo processado. O CAP deve apresentar qualidade e consistência próprias para uso direto na formulação de concretos asfálticos, e seu uso é adequado para pavimentação por apresentar boas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, além de flexibilidade e durabilidade (ROHDE, 2007, p. 31).

Existem diferentes tipos de CAP, sendo que cada um apresenta características próprias para o uso, tais como viscosidade, ponto de amolecimento e penetração. Neste estudo foi utilizado o CAP 50/70, o mais utilizado no País. O quadro 12 as principais características deste ligante.

Características	Unidade	Limites
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	50 a 70
Ponto de amolecimento, mín.	°C	46
Viscosidade Saybolt-Furol		
a 135°C, mín.	s	141
a 150°C, mín.	s	50
a 177 °C, mín.	s	30 a 150
Viscosidade Brookfield		
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.	cP	274
a 150°C, mín.	cP	112
a 177°C, SP 21	cP	57 a 285
Índice de Sustentabilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)
Ponto de fulgor, mín.	°C	235
Solubilidade em tricloroetilena, mín.	% massa	99,5
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	60
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos		
Varição em massa, máx.	% massa	0,5
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	20
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8
Penetração retida, mín.	%	55

Quadro 12: especificação brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo CAP 50-70
(BERNUCCI et al., 2008, p. 61)

5.2.3 Cinza pesada

As cinzas pesadas utilizadas neste trabalho (figura 11) são provenientes da empresa Aracruz Celulose S.A. Guaíba/RS. Suas características foram estudadas pela Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) e disponibilizadas para uso em misturas asfálticas. No geral, as características são muito semelhantes entre as demais cinzas produzidas pela combustão do

carvão em outras partes do estado do Rio Grande do Sul, conforme foi apresentado no capítulo 3.

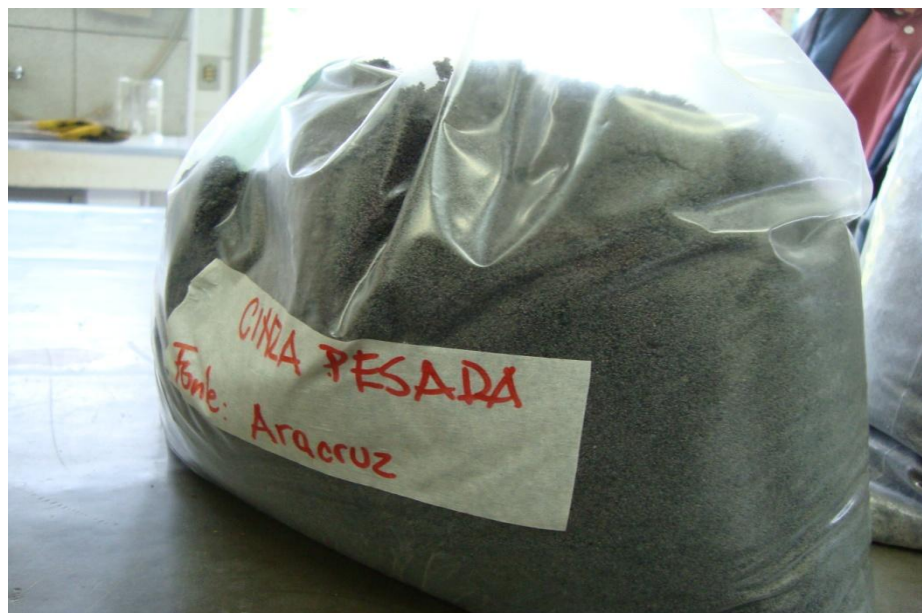


Figura 11: cinza pesada utilizada

A avaliação granulométrica para o estudo foi executada pela CIENTEC. Não foram determinados os limites de Atterberg (limites de liquidez e limite de plasticidade) devido a natureza granular do material. A cinza pesada estudada pode ser considerada não plástica e não coesiva. Outra característica interessante para ser apontada das cinzas pesadas é o seu coeficiente médio de inchamento, que esta na ordem de 1,42. Sendo a umidade crítica, valor que indica a constante média de inchamento, é de 21,5% (ZWONOK et al., 2006, p. 78).

De acordo com a granulometria, a cinza pesada estaria enquadrada com um percentual de aproximadamente 34% de silte, ficando concentrada sua constituição principalmente em areia fina e média. A figura 12 apresenta a curva granulométrica da cinza pesada.

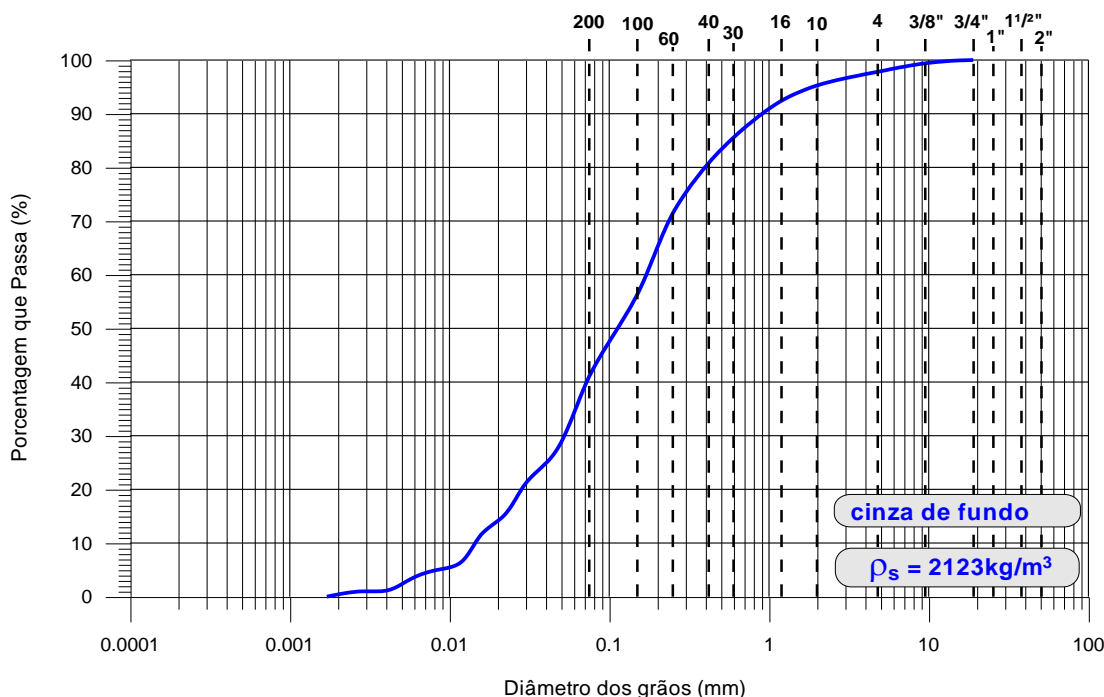


Figura 12: curva granulométrica da cinza pesada utilizada

A cinza pesada apresenta uma massa específica dos grãos baixa (2123 kg/m^3), quando comparada com a dos solos. De acordo com Zwonok et al. (2006, p. 74), esse fato pode ser originado devido a possível presença de gases no seu interior. Outras características físicas importantes do material vêm dos ensaios de compactação e do Índice Suporte Califórnia (ISC). Os valores destes ensaios são apresentados no quadro 13, para energia normal e intermediária de compactação.

Massa específica aparente seca máxima (kg/m^3)		Umidade ótima (%)		ISC (%)		Expansão (%)	
normal	intermediária	normal	intermediária	normal	intermediária	normal	intermediária
869	960	52,8	46,2	25	42	0,0	0,0

Quadro 13: resultados dos ensaios de compactação e ISC das cinzas pesadas (ZWONOK et al., 2006, p. 75)

Percebe-se que as cinzas pesadas apresentam um valor elevado de umidade ótima, em torno de 50%, se comparadas as de solos que variam normalmente entre 9% e 18%, mas o material não apresenta expansão. A alta porosidade da cinza pesada pode justificar o alto teor de umidade ótima.

5.3 EXECUÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para estudar o comportamento das misturas asfálticas a quente usando cinza pesada, foram realizados ensaios para determinação da resistência à tração, do módulo de resiliência, estabilidade Marshall e fluência. As recomendações propostas pelas Normas que regulamentam os ensaios estão citadas no capítulo 4 deste trabalho, ficando destinado a este os procedimentos laboratoriais e as sequências específicas adotadas. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (LPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

5.3.1 Moldagem dos corpos-de-prova

Para o estudo foram confeccionados CP com percentuais de cinza pesada de 6% e 10%. Estas percentagens ocorram na substituição da faixa granulométrica correspondente a faixa C do DNIT, por parte da areia normalmente empregada (entre as peneiras de número 4 e 200) com pequeno ajuste nas outras faixas. A figura 13 apresenta a faixa de trabalho.

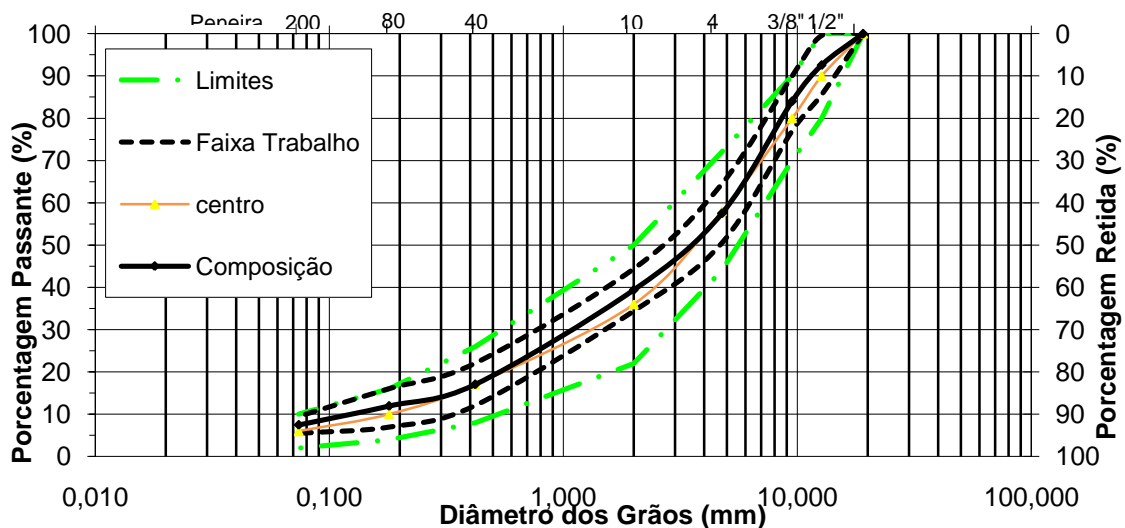


Figura 13: faixa granulométrica de trabalho (faixa C do DNIT)

Como a cinza pesada tem um peso específico menor que a areia, foi necessário colocar mais quantidade de cinza para ajustar pesos e volumes dos CP. Importante ressaltar que foi

moldado um CP pioneiro, com a finalidade de testar o teor de ligante na mistura e de forma visual checar o comportamento antes de moldar os demais CP. Os quadros 14 e 15 apresentam as distribuições que compõe a mistura.

% mistura		21%	20%	53%	6%
PENEIRA	mm	BRITA 0	BRITA 1	PÓ-DE-PEDRA	CINZA
3/4"	19,1	21,0	20,0	53,0	6,0
1/2"	12,7	13,6	20,0	53,0	6,0
3/8"	9,50	5,1	20,0	53,0	6,0
n 4	4,76	0,3	1,6	49,8	5,9
n 10	2,00	0,1	0,4	33,1	5,7
n 40	0,42	0,1	0,3	11,8	4,8
n 80	0,18	0,1	0,2	7,8	3,8
n 200	0,074	0,0	0,2	4,8	2,5
	frações	BRITA 0	BRITA 1	PÓ-DE-PEDRA	CINZA

Quadro 14: composição granulométrica da mistura asfáltica com 6% de cinza pesada

% mistura		21%	25%	44%	10%
PENEIRA	mm	BRITA 0	BRITA 1	PÓ-DE-PEDRA	CINZA
3/4"	19,1	21,0	25,0	44,0	10,0
1/2"	12,7	13,6	25,0	44,0	10,0
3/8"	9,50	5,1	25,0	44,0	9,9
n 4	4,76	0,3	2,0	41,3	9,8
n 10	2,00	0,1	0,5	27,5	9,5
n 40	0,42	0,1	0,4	9,8	8,1
n 80	0,18	0,1	0,3	6,5	6,3
n 200	0,074	0,0	0,2	4,0	4,1
	frações	BRITA 0	BRITA 1	PÓ-DE-PEDRA	CINZA

Quadro 15: composição granulométrica da mistura asfáltica com 10% de cinza pesada

Nas misturas foram usados teores de ligante de 5,5%, 6,0% e 6,5%. No entanto, para um percentual de cinza pesada de 6%, não foi possível executar misturas com 6,5% de ligante pois a mistura se mostrou **molhada** para moldar.

Para um percentual de 10% de cinza pesada, não foi possível executar misturas com o teor de 5,5% de ligante, pois a mesma se encontrava **seca**, impossibilitando a moldagem dos mesmos. As figuras 14 e 15 mostram, respectivamente, o material separado para ensaio e a prensa para compactação dos CP.



Figura 14: material sendo separado nas frações de moldagem

A moldagem dos CP for feita segundo a norma DNER-ME 043 (BRASIL, 1995). Foram feitas as medições das características volumétricas dos CP, para verificar se os mesmos se enquadram nas recomendações de volume de vazios entre 3% e 5%.



Figura 15: prensa Marshall para compactação dos CP

Em relação aos CP moldados com 10% de cinza pesada, nota-se que a interferência deste agregado no aumento dos índices de vazios, ou seja, precisou-se de mais ligante para atingir o volume de vazios recomendado. Justificativa para este fato é a capacidade de absorção das cinzas serem mais elevadas que as de outros agregados comumente empregados. A figura 16 mostra os CP após moldagem, resfriando ao ar livre por 24h, antes da desmoldagem. O quadro 16 apresenta as temperaturas de moldagem.

Temperatura (°C)	CAP 50/70
Mistura	157 – 164
Compactação	144 – 150

Quadro 16: temperatura de moldagem do CAP 50-70



Figura 16: CP moldados

5.2.2 Estabilidade Marshall e Fluência

O procedimento de ensaio seguiu as recomendações da Norma DNER-ME 043 (BRASIL, 1995). Após a compactação, as amostras foram armazenadas ao ar livre durante 24 horas e extraídas dos moldes. Foram determinadas as características físicas (dimensão e peso) dos CP e então imersos em banho à 60 °C de temperatura. Imediatamente após o banho, os CP foram submetidos ao ensaio de estabilidade Marshall e fluência.

Foram ensaiados dois CP para cada percentual de cinza pesada e teor de ligante asfáltico. As leituras da estabilidade foram corrigidas em função da altura do CP com o uso da fórmula 7. A fluência foi lida com o auxílio do defletômetro, junto com a estabilidade máxima, obtendo assim a máxima deformação suportada pela mistura. Em ambos os resultados foi realizado a média dos dois CP ensaiados.

5.2.3 Resistência à Tração

A realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral nos corpos-de-prova cilíndricos, seguiu as recomendações da Norma DNER-ME 138 (BRASIL, 1994b). As amostras foram submetidas ao carregamento de compressão em planos paralelos diametralmente opostos com velocidade aproximada de 0,8mm/s, gerando assim um plano de tensões de tração, perpendicular ao da carga aplicada. A figura 17 mostra um dos CP sendo ensaiado e a figura 18, após a ruptura.

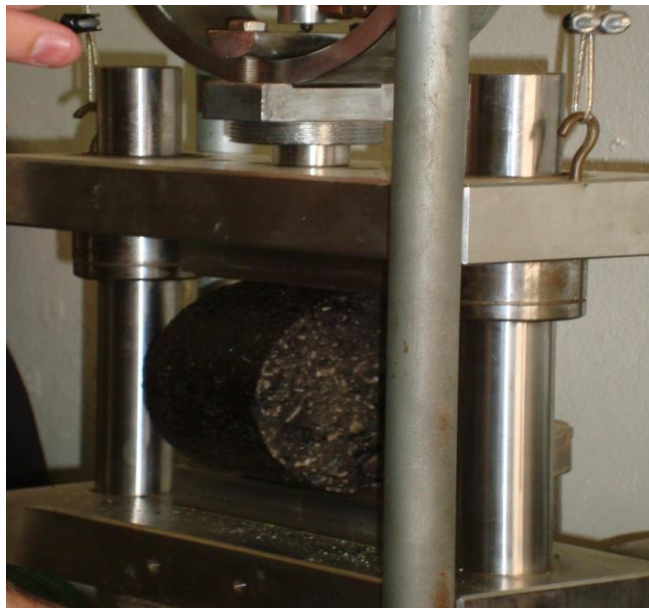


Figura 17: CP sendo ensaiado à tração



Figura 18: CP após ensaiado à tração

5.2.4 Módulo de Resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência nas amostras de misturas asfálticas seguiram os procedimentos apresentados pela Norma DNER-ME 133 (BRASIL, 1994a). Os ensaios foram realizados no equipamento do LAPAV, composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1 Hz.

Os ensaios foram executados dentro de uma câmara de temperatura controlada sob a aplicação de carregamento, com tempo de 0,1 s e 0,9 s de repouso. As deformações horizontais foram medidas por LVDT (*Linear variable differential transformer*). Para o cálculo do MR foi considerado o coeficiente de Poisson de 0,30 para temperatura de 25 °C. A figura 19 apresenta um CP sendo ensaiado no equipamento citado.



Figura 19: CP no ensaio de módulo de resiliência

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo será abordado a relação de resultados obtidos nos ensaios de estabilidade Marshall, fluência, módulo de resiliência e resistência à tração. Também está apresentado uma análise mecânica executada através do programa Everstress 5.0, com a finalidade de checar os resultados encontrados e dimensionar um pavimento flexível. Desta forma, chegar um valor N (número de eixos padrão) e também a espessura da camada de revestimento, comparando os resultados com misturas convencionais.

6.1 ENSAIOS MECÂNICOS

Estão relacionados nesta seção os resultados dos ensaios mecânicos realizados para esta pesquisa. Também constam os devidos comentários dos resultados bem como a comparação com os valores mínimos exigidos para o uso da mistura asfáltica para camada de revestimento.

6.1.1 Estabilidades Marshall e Fluências

Os valores mínimos para as características volumétricas das misturas especificados pela norma do DNIT-ES 031 (BRASIL, 2006) estão presente no quadro 17, para CP moldados com 75 golpes em cada face. O quadro 18 e as figuras 20 e 21 apresentam os resultados Marshall das misturas projetadas. Para os cálculos desses parâmetros foram usadas as fórmulas apresentadas na seção 4.2, e os resultados apresentados são a média de cinco determinações.

Para os dois teores de cinza, o aumento no teor de ligante resultou na diminuição do Vv e do VAM, e aumento da RBV. A mistura de 6% de cinza pesada e 6% de ligante apresenta Vv que se enquadra nas especificações (quadro 17) para uso como camada de rolamento, no entanto, a RBV foi maior que os limites especificados. A mistura de 5,5% de ligante e 6% de cinza apresenta Vv dentro dos limites para uso como camada de rolamento e para camada ligação (Binder), mas a RBV ficou bem próximo ao limite especificado, acima para camada de ligação e abaixo para camada de rolamento.

Tipo de mistura	Método de ensaio	Camada de rolamento	Camada de ligação
Vv	DNER-ME 043	3 – 5	4 – 6
RBV (%)	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25 °C, mínima (MPa)	DNER-ME 138	0,65	0,65

Quadro 17: limites para uso da mistura DNIT-ES 031 (BRASIL, 2006, p. 5)

CP	Convencional	6% C + 5,5% L	6% C + 6,0% L	10% C + 6,0% L	10% C + 6,5% L
Teor de cinza pesada (%)	-	6	6	10	10
Teor de ligante (%)	5	5,5	6	6	6,5
Altura (cm)	6,50	6,56	6,61	6,32	6,11
Diâmetro (cm)	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20
Volume de vazios (%)	2,26	4,7	2,12	6,49	4,46
Relação Betume/Vazios (%)	85	73	87	67	77
Vazios no Agregado Mineral (%)	15	17,42	16	20	19
Estabilidade (kgf)	1600	1042	1226	1113	1329
Fluência (mm)	3,9	9,9	10,0	9,9	11,0

Quadro 18: parâmetros Marshall

Para o 10% de cinza pesada e 6% de ligante o Vv ficou elevado, mas a RBV ficou dentro dos limites, para ambas as camadas do revestimento. Já com relação aos 10% de cinza e 6,5% de ligante, tanto Vv como RBV ficaram dentro da especificação para o uso em camada de rolamento, e o RBV acima do tolerável para uso em camada de ligação.

O quadro 19 apresenta os valores recomendados para a estabilidade e fluência segundo a NBR 12891 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993, p. 12). Nele estão expressos os valores sugeridos usando como critério a pressão do pneu. As misturas apresentaram estabilidades superiores a mínima recomendada pela norma e deformação máxima (fluência) superiores aos recomendados. Os valores de estabilidade e de fluência aumentaram com o teor de ligante e todas as misturas ficaram com estabilidade superior a 350 kgf (especificação).

Pressão dos Pneus	Nº de golpes	Estabilidade (kgf)	Fluência (0,1mm)
Até 7 kgf/cm ²	50	Mínimo 250	20 – 46
De 7 a 14 kgf/cm ²	75	Mínimo 350	20 – 46

Quadro 19: valores para estabilidade e fluência, baseado na NBR 12891 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993, p. 12)

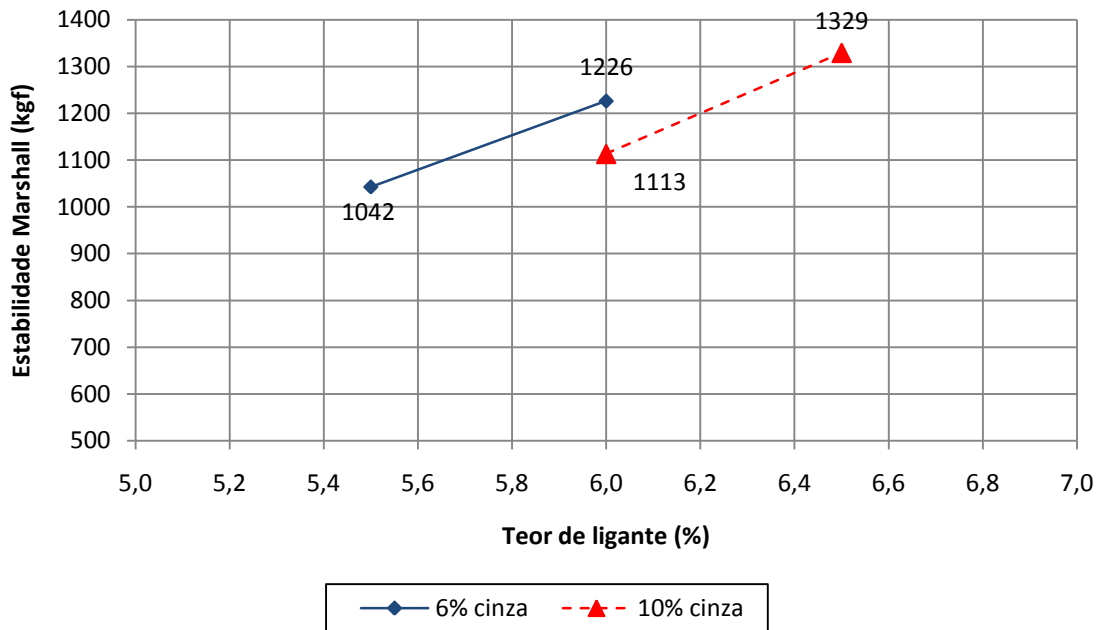


Figura 20: resultado da estabilidade Marshall

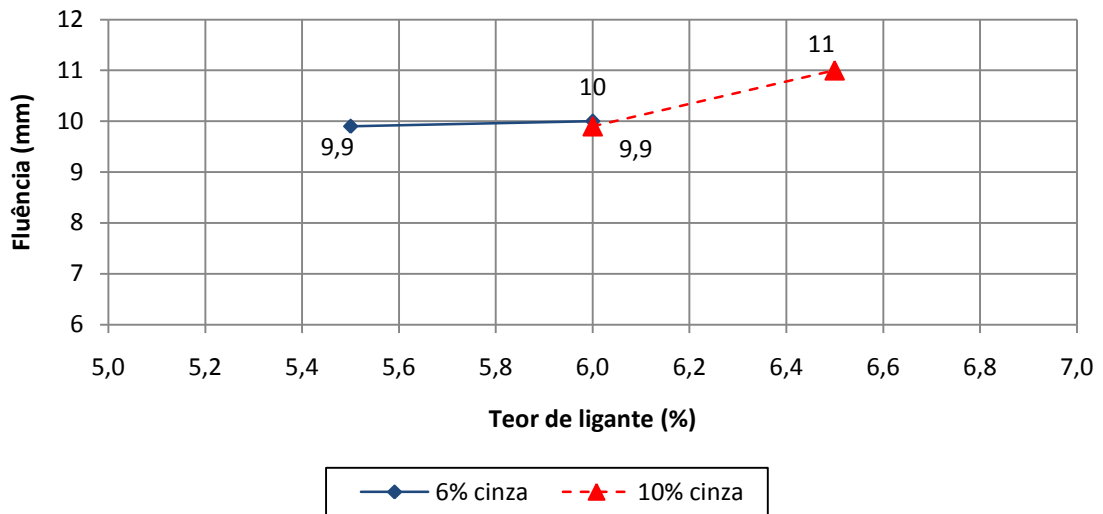


Figura 21: resultados da fluência

Os gráficos apresentados nas figuras 22 e 23 apresentam uma comparação com o resultado de uma mistura convencional com CAP 50/70. Nota-se que a presença de cinza pesada nas misturas asfálticas modificou a resistência das misturas, ou seja, houve uma queda nos valores de estabilidade. Quanto a deformação total, todas as misturas apresentaram maior fluência que mistura convencional.

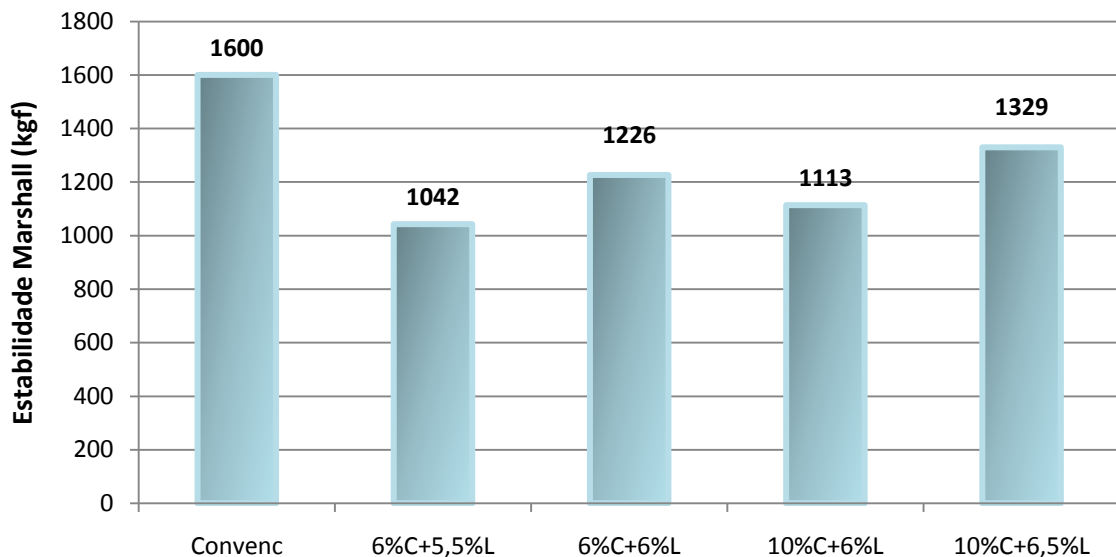


Figura 22: comparação das estabilidades Marshall

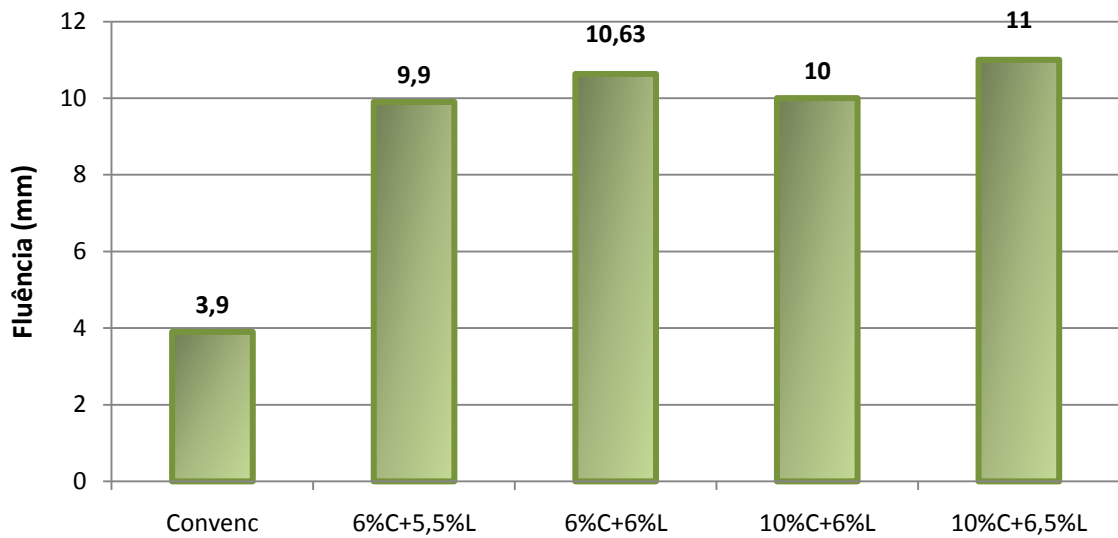


Figura 23: comparação das fluências

6.1.2 Módulos de Resiliência e Resistências à Tração

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência estão apresentados na figura 24. Para o mesmo teor de ligante, o valor de MR sofreu uma pequena queda com o aumento da porcentagem de cinza pesada na mistura. Para o mesmo teor de cinza, os comportamentos foram distintos: com 6% de cinza, o MR diminuiu com o teor de ligante e com 10% de cinza o MR aumentou com o teor de ligante. Ambas as dosagens apresentam valores que superam os mínimos recomendados, que é de 2100 MPa.

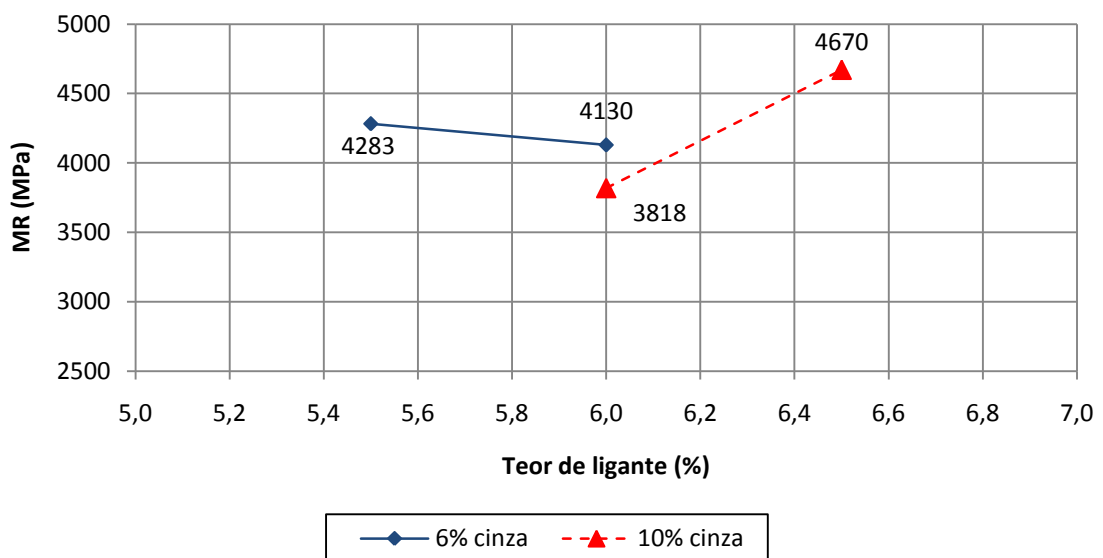


Figura 24: resultados dos módulos de resiliência

A figura 25 apresenta um gráfico para comparação dos resultados das misturas com cinza pesada com uma mistura asfáltica convencional. Como é possível perceber os valores das misturas com cinza pesada foram inferiores ao convencional, sendo a constituição de 10% de cinza pesada e 6% de ligante a mais inferior.

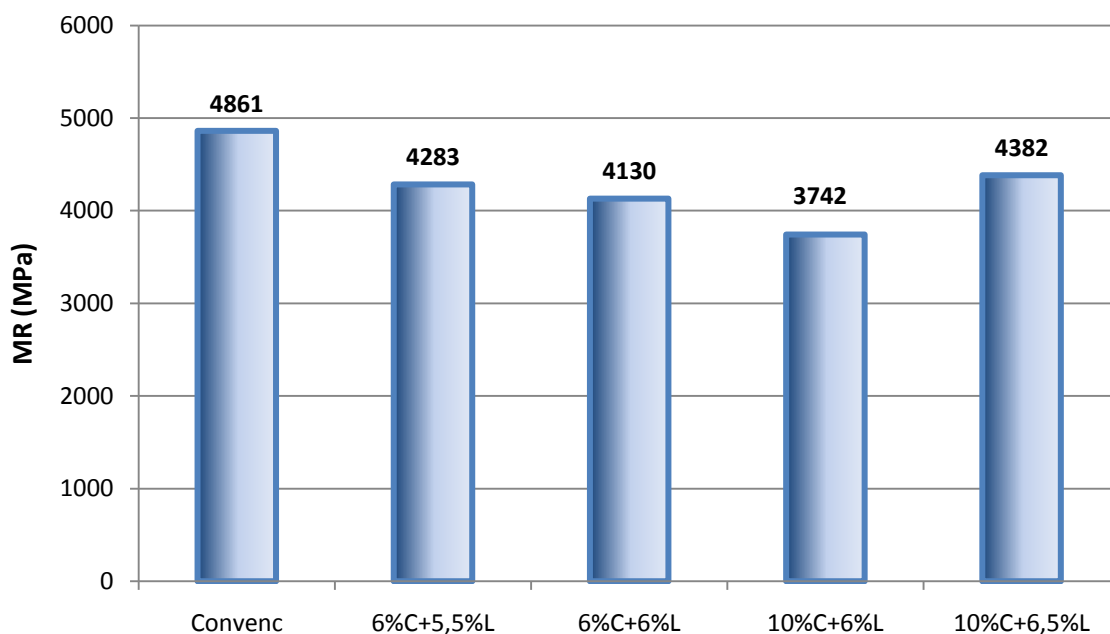


Figura 25: comparação dos módulos de resiliência

Com relação ao ensaio de resistência a tração, os resultados estão apresentados na figura 26. Semelhante aos resultados dos MR, as RT também apresentam uma tendência similar, ocorrendo um aumento acentuado com o incremento do ligante e pequena queda com a adição de mais cinza pesada.

Mas em termos de valores numéricos ambos os resultados estão próximos, pois a diferença entre porcentagens de cinza não ficou muito diferente. Diferente dos MR, o aumento no teor de ligante para 10% de cinza não gerou um grande aumento na sua resistência, ao contrário da porcentagem de 6%, que neste ensaio apresentou um aumento mais elevado com mais ligante asfáltico. Os valores de RT foram superiores a 0,65 MPa, recomendado pela Norma DNIT-ES 31 (BRASIL, 2006).

Da mesma maneira que foi feito uma comparação com uma mistura convencional com os MR, pode ser feito com as RT, conforme apresentado na figura 27. Nota-se que as resistências

foram superiores ao convencional, sendo o melhor desempenho para o percentual de 6% de cinza pesada com 6% de ligante.

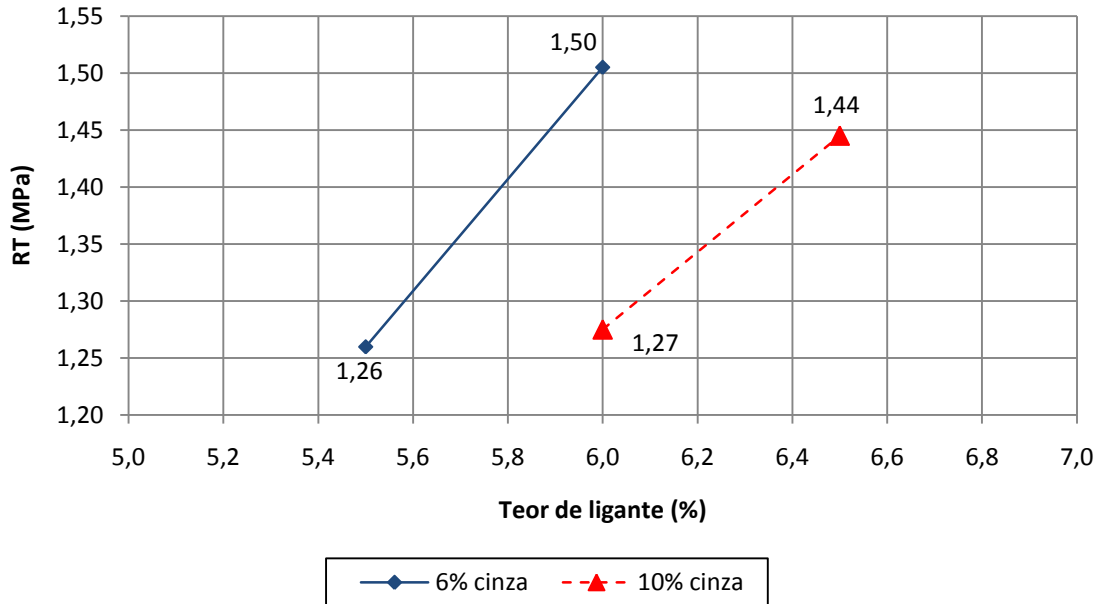


Figura 26: resultados das resistências à tração

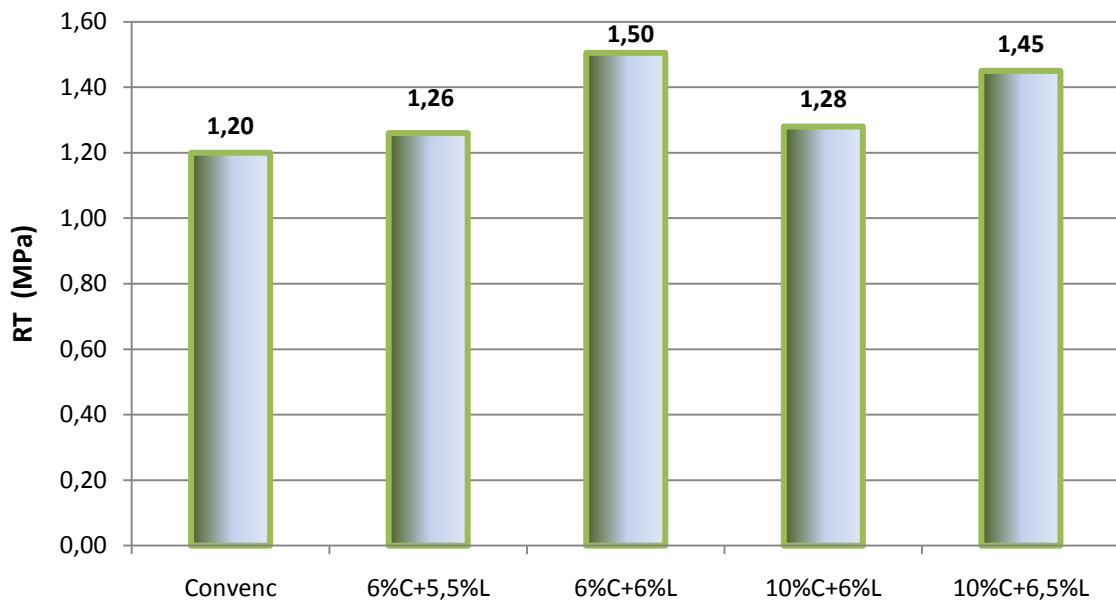


Figura 27: comparação das resistências à tração

A relação MR/RT permite avaliar o comportamento das misturas asfálticas com relação ao trincamento. Quanto menor o valor da relação, maior flexibilidade terá a mistura, devida a uma boa resistência à tração. Além disso, para garantir um desempenho adequado as misturas

mais rígidas devem apresentar alta resistência à tração, devido as cargas impostas pelo tráfego sobre o pavimento que geram uma concentração de esforços no interior da camada asfáltica (ROHDE, 2007, p. 152). A figura 28 apresenta os valores de MR/RT para as misturas estudadas e a figura 29 a comparação com a mistura convencional..

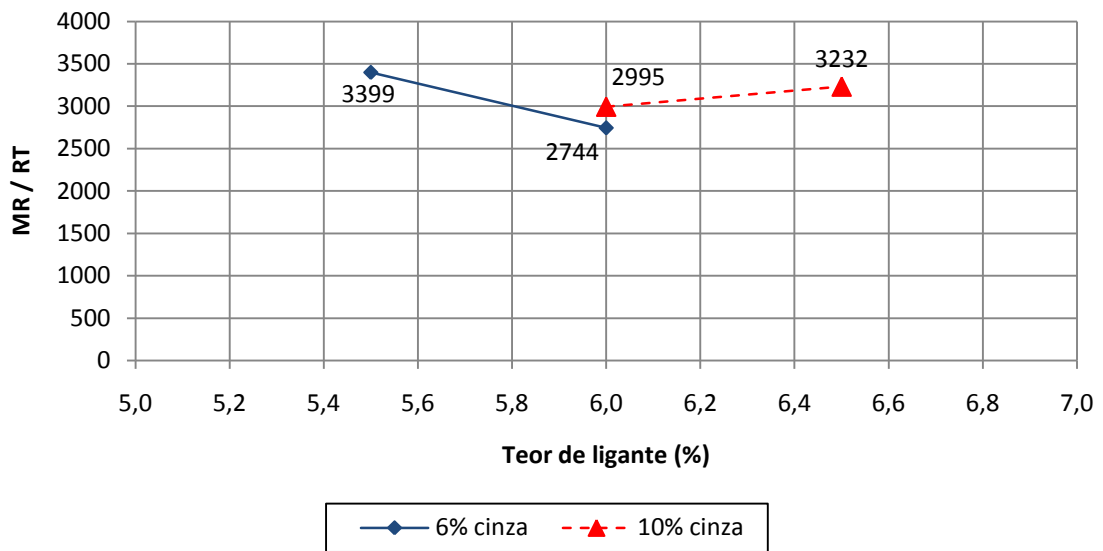


Figura 28: resultados das relações MR/RT

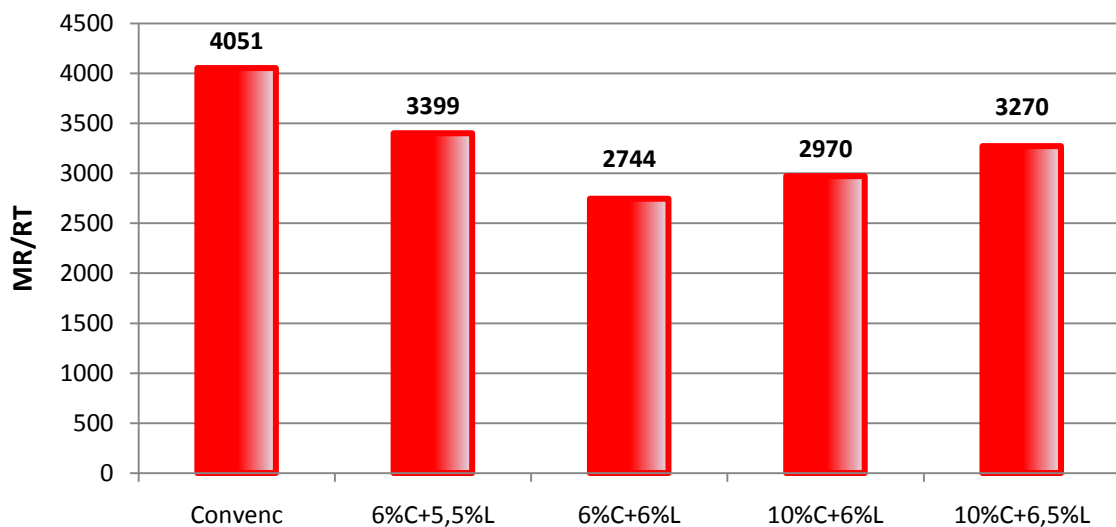


Figura 29: comparação das relações MR/RT

A inserção de cinza pesada afetou o valor da razão MR/RT, e todas as misturas estudadas apresentaram valores inferiores ao da mistura convencional. O concreto asfáltico formulado

com 6% de cinza pesada e com teor de 6% de ligante apresentou a melhor relação, podendo ser considerado um material com rigidez compatível com a resistência à tração.

6.2 ANÁLISE MECANÍSTICA

Para estimar uma vida de fadiga do revestimento foi usado o modelo de previsão desenvolvido em laboratório por Pinto (1991), a partir da deformação de tração e do MR da camada asfáltica, sendo este apresentado na fórmula 11, deste trabalho.

Para realizar a análise mecanística foram necessários dados do comportamento dos materiais da estrutura, e para isto, foram utilizados os modelos de MR para a camada de base granular (fórmula 12) e para camada coesiva argilosa do subleito (fórmula 13), apresentadas por Rohde (2007, p. 186):

$$MR = 506 \times \theta^{0,52} \quad (\text{fórmula 12})$$

$$MR = 134 \times (0,01\sigma)^{-0,32} \quad (\text{fórmula 13})$$

Onde:

θ : soma das tensões principais (kPa);

σ_d : tensão desvio (kPa).

Os valores dos módulos de resiliência foram obtidos nos ensaios mecânicos e a deformação de tração estimada pelo programa. A figura 30 apresenta a estrutura de referência (espessuras em centímetros) usada para comparação com uma mistura convencional. A base é constituída de brita graduada e a sub-base de agregado basáltico oriundo do britador primário de módulo de resiliência estimado em 250 MPa. O subleito é projeto em solo argiloso com comportamento laterítico. A figura 31 apresenta a tela do programa Everstress 5.0 de entrada das características das camadas.

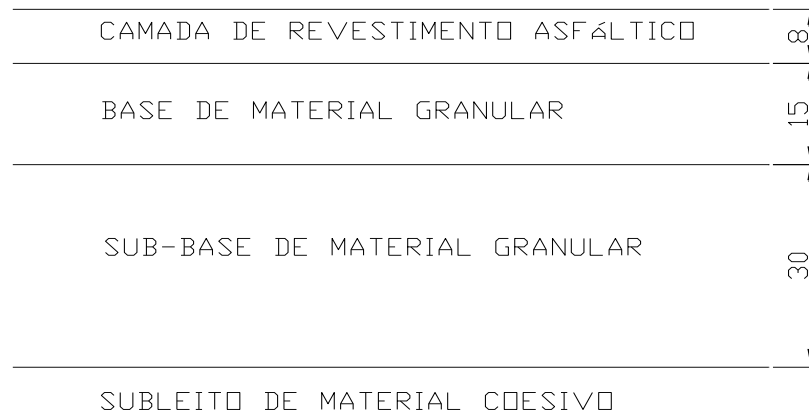


Figura 30: estrutura de referência (ROHDE, 2007, p. 188)

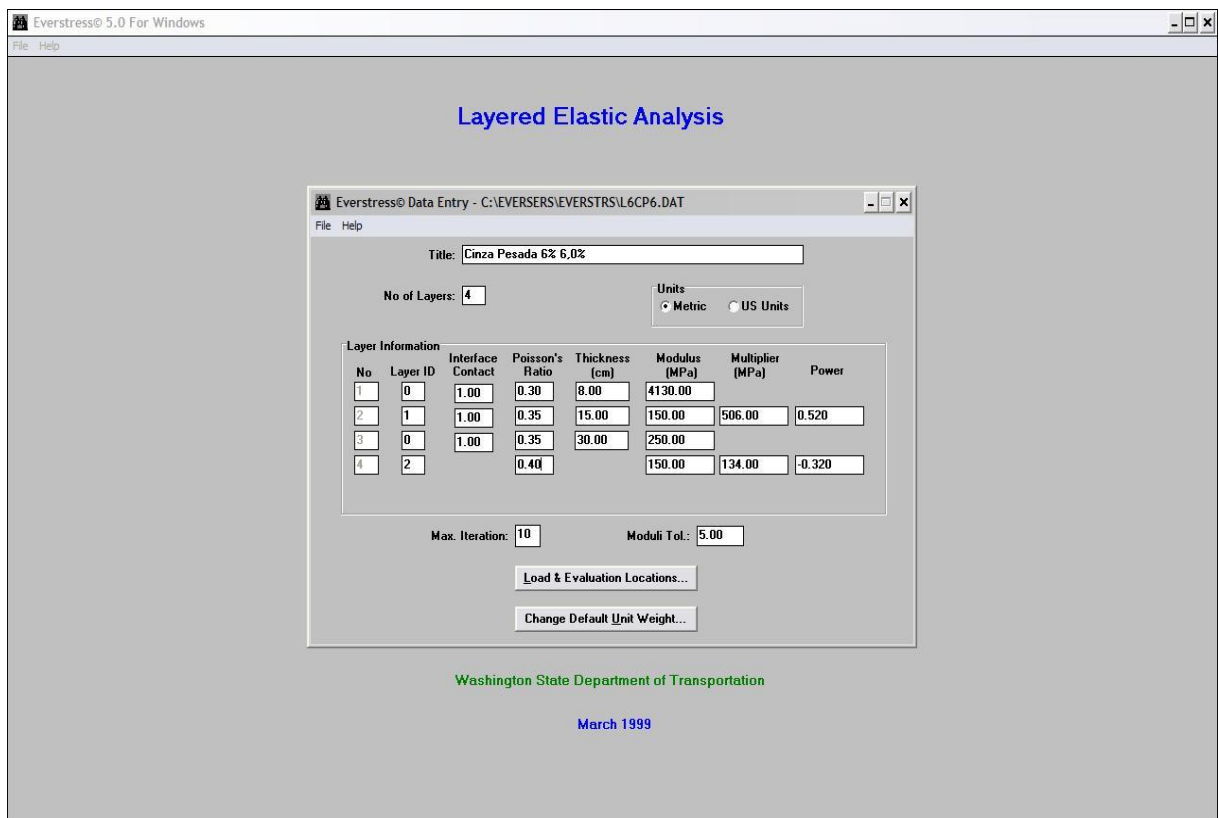


Figura 31: parâmetros de entrada Everstress 5.0

O quadro 20 apresenta os resultados obtidos na análise da estrutura, comparando com a estrutura de referência de uma mistura asfáltica a quente convencional. Foi usado o fator de 10^4 , para converter o valor de laboratório de N, para de campo. Os valores ficaram bem próximos ao valor de referência, o que mostra uma boa estimativa para o uso do material para camada de revestimento.

Parâmetro	MR (MPa)	ϵ_t (10^{-6} mm)	σ_t (MPa)	N_f
Convencional	4861	250	1,28	$4,21 \times 10^5$
6% C + 5,5% L	4283	240	1,25	$4,67 \times 10^5$
6% C + 6,0% L	4130	245	1,23	$4,42 \times 10^5$
10% C + 6,0% L	3742	255	1,16	$3,96 \times 10^5$
10% C + 6,5% L	4382	238	1,28	$4,78 \times 10^5$

Quadro 20: resultados das análises mecânicas

O maior N encontrado foi para a mistura com 10% de cinza pesada e com 6,5% de ligante, a qual apresenta a menor deformação de tração. Todas as tensões de tração sofridas pelo camada de revestimento são inferiores as resistências à tração das misturas asfálticas a quente.

O único valor de N que ficou abaixo da estrutura com mistura convencional foi a mistura de 10% de cinza pesada com 6% de ligante. Isso se justifica principalmente por ser a mistura com o menor módulo de resiliência. Essa mistura também apresentou o maior valor de volume de vazios. Esse resultado por estar associado ao fato de que substituindo a areia integralmente pela cinza pesada, necessitaria de mais ligante pra estabilizar a mistura. A alta porosidade e o elevado percentual da umidade ótima, podem ser indícios dessa alta absorção e a necessidade de mais ligante asfáltico.

7 CONCLUSÕES

O uso de cinza pesada nas misturas asfálticas a quente se mostrou eficiente, atingindo bons resultados de resistência. Percebeu-se que a cinza, apesar de possuir granulometria semelhante a da areia é muito porosa, o que pode refletir numa alta absorção do ligante asfáltico utilizado na mistura.

O cálculo de tensões, deformações e deslocamentos foi feito com o programa Everstress 5.0. Foi verificado o número de aplicações de carga (N) que levaria o revestimento asfáltico executado com cinza pesada à ruptura por fadiga.

Foram testadas quatro composições de misturas. Na composição com percentual de cinza pesada de 10%, valor que substitui totalmente a porção de areia na faixa granulométrica proposta (faixa C do DNER), necessitou de mais ligante na estabilização e na moldagem dos corpos-de-prova. O aumento da quantidade de cinza fez aumentar também o volume de vazios, o que necessitou de mais ligante. A mistura com 10% de cinza pesada e 6,5% de ligante apresentou bom comportamento, ficando seu uso adequado dentro dos limites estabelecidos por normas brasileiras. Esta mistura apresentou o maior N entre as demais ensaiadas. A mistura de 10% de cinza pesada e 6,0% de ligante foi a que apresentou os piores resultados, fato justificado pelo alto percentual de cinza e a necessidade de maior quantidade de ligante asfáltico para a mistura.

A mistura com 6% de cinza pesada e 5,5% de ligante também apresentou bons resultados, mas sua relação RBV ficou fora da faixa recomendada pelo DNIT-ES 031 (BRASIL, 2006). Essa mistura apresentou um N elevado. A mistura com 6,0% de ligante apresentou valores intermediários, porém, seu percentual de vazios ficou abaixo do recomendado.

Todas as misturas tiveram problemas com relação a fluência, ficando acima do recomendado pela NBR 12891 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993). Esse fato pode ser justificado pela porosidade da cinza pesada, que quando sobre uma carga quebra sua microestrutura, reacomodando-se.

Com os resultados dos ensaios mecânicos conclui-se que o uso das cinzas pesadas em misturas asfálticas a quente é viável, pois apresentam características mecânicas adequadas para uso em rodovias. No entanto, devido à alta porosidade deste material, nas misturas

executadas nesta pesquisa foram necessárias mais quantidade de ligante. Para misturas asfálticas com cinza pesada em substituição de uma parcela de agregado natural deve-se proceder a uma análise de custo para a viabilização do uso em grande quantidade, levando em conta a distância de transporte entre a rodovia e os centros produtores de cinzas , já que a cinza é um resíduo da queima do carvão e está disponível sem custos adicionais, sendo fornecida gratuitamente pelas termelétricas.

O uso das cinzas pesadas diminuiriam, também, os problemas de impactos ambientais, já que estas geralmente são depositadas em terrenos a céu aberto sem um destino adequado, como é recomendado pela NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). De acordo com a norma, as cinzas pesadas estão classificadas com classe II A – não inertes, e necessitam ser destinadas a aterros sanitários apropriados.

Assim, a utilização de um agregado novo de desempenho mecânico satisfatório, como tem se mostrado a cinza pesada é de grande importância para o meio ambiente, pois estaria evitando novas áreas de contaminação e limpando os locais já poluídos, além de diminuir os custos com seu uso em misturas asfálticas a quente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207**: terminologia e classificação de pavimentos. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 12891**: dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 12653**: materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **NBR 10004**: resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ADEBA, 2008.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 133**: misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994a.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 138**: misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994b.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 043**: misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ES 031**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

CARDOSO, A. P. P. **Estudo em laboratório do comportamento mecânico de misturas betuminosas utilizadas em pistas experimentais**. 2002. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. 478 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ROHDE, G. M. Cinzas de Carvão no Brasil: restrições ambientais e medidas mitigadoras. In: _____. (Org.). **Cinzas de carvão fóssil no Brasil**: aspectos técnicos e ambientais. 1. ed. Porto Alegre: CIENTEC, 2006. p. 137-185.

ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos**. 2007. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WASHINGTON STATE, Department of Transportation. **Everseries Pavement Programs**, versão 5: Washington State. Conjunto de programas para análises diversas em pavimentos, desde análises mecánísticas até retroanálises. Disponível em:

<<http://www.wsdot.wa.gov/biz/mats/apps/epg.htm>>. Acesso em junho 2010.

ZWONOK, O.; CHIES, F., SILVA, N. I. W. Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil: características e possibilidades de uso. In: ROHDE, G. M. (Org.). **Cinzas de carvão fóssil no Brasil**: aspectos técnicos e ambientais. 1. ed. Porto Alegre: CIENTEC, 2006. p. 27-136.

**ANEXO A – Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de
lixiviação segundo a NBR 10004
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 67)**

Anexo F (normativo)

Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação

Parâmetro	Código de identificação	Limite máximo no lixiviado mg/L	CAS - <i>Chemical Abstrat Substance</i>
Inorgânicos			
Arsênio	D005	1,0	7440-38-2
Bário	D006	70,0	7440-39-3
Cádmio	D007	0,5	7440-43-9
Chumbo	D008	1,0	7439-92-1
Cromo total	D009	5,0	7440-47-3
Fluoreto	D010	150,0 **)	
Mercúrio	D011	0,1	7439-97-6
Prata	D012	5,0*)	7440-22-4
Selênio	D013	1,0	7782-49-2
Pesticidas			
Aldrin + dieldrin	D014	0,003 **)	309-00-2; 60-57-1
Clordano (todos os isômeros)	D015	0,02	57-74-9
DDT (p, p' DDT+ p, p' DDD + p, p' DDE)	D016	0,2	50-29-3
2,4-D	D026	3,0	94-75-7
Endrin	D018	0,06	72-20-8
Heptacloro e seus epóxidos	D019	0,003	76-44-8
Lindano	D022	0,2	58-89-9
Metoxicloro	D023	2,0	72-43-5
Pentaclorofenol	D024	0,9	87-86-5
Toxafeno	D025	0,5*)	8001-35-2
2,4,5-T	D027	0,2 **)	93-76-5
2,4,5-TP	D028	1,0*)	93-72-1
Outros orgânicos			
Benzeno	D030	0,5*)	71-43-2
Benzo(a) pireno	D031	0,07	50-32-8

Parâmetro	Código de identificação	Limite máximo no lixiviado mg/L	CAS - <i>Chemical Abstrat Substance</i>
Outros orgânicos			
Cloreto de vinila	D032	0,5	75-01-4
Clorobenzeno	D033	100 ^{*)}	108-90-70
Clorofórmio	D034	6,0 ^{*)}	67-66-3
Cresol total ^{***)}	D035	200,0 ^{*)}	
o-Cresol	D036	200,0 ^{*)}	95-48-7
m-Cresol	D037	200,0 ^{*)}	108-39-4
p-Cresol	D038	200,0 ^{*)}	106-44-5
1,4-Diclorobenzeno	D039	7,5 ^{*)}	106-46-7
1,2-Dicloroetano	D040	1,0	107-06-2
1,1-Dicloroetileno	D041	3,0	75-35-4
2,4-Dinitrotolueno	D042	0,13 ^{*)}	121-14-2
Hexaclorobenzeno	D021	0,1	118-74-1
Hexaclorobutadieno	D043	0,5 ^{*)}	87-68-3
Hexacloroetano	D044	3,0 ^{*)}	67-72-1
Metiletilcetona	D045	200,0 ^{*)}	78-93-3
Nitrobenzeno	D046	2,0 ^{*)}	98-95-3
Piridina	D047	5,0 ^{*)}	110-86-1
Tetracloroeto de carbono	D048	0,2	56-23-5
Tetracloroetileno	D049	4,0	127-18-4
Tricloroetileno	D050	7,0	79-01-6
2,4,5-Triclorofenol	D051	400,0 ^{*)}	95-95-4
2,4,6-Triclorofenol	D052	20,0	88-06-2
<p>*) Parâmetros e limites máximos no lixiviado extraídos da <i>USEPA - Environmental Protection Agency 40 CFR - Part 261 - 24 - "Toxicity Characteristics"</i>.</p> <p>**) Parâmetro e limite máximo no lixiviado mantido, extraído da versão anterior da ABNT NBR 10004:1987.</p> <p>***) O parâmetro Cresol total somente deve ser utilizado nos casos em que não for possível identificar separadamente cada um dos isômeros</p> <p>NOTA Os demais poluentes e limites máximos no lixiviado deste anexo foram baseados na Portaria nº 1469/2000 do MS, multiplicados pelo fator 100.</p>			

**ANEXO B – Padrões para ensaio de solubilização segundo a NBR 10004
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 69)**

Anexo G
(normativo)

Padrões para o ensaio de solubilização

Parâmetro	Limite máximo no extrato mg/L
Aldrin e dieldrin	$3,0 \times 10^{-5}$
Alumínio	0,2
Arsênio	0,01
Bário	0,7
Cádmio	0,005
Chumbo	0,01
Cianeto	0,07
Clordano (todos os isômeros)	$2,0 \times 10^{-4}$
Cloreto	250,0
Cobre	2,0
Cromo total	0,05
2,4-D	0,03
DDT (todos os isômeros)	$2,0 \times 10^{-3}$
Endrin	$6,0 \times 10^{-4}$
Fenóis totais	0,01
Ferro	0,3
Fluoreto	1,5
Heptacloro e seu epóxido	$3,0 \times 10^{-5}$
Hexaclorobenzeno	$1,0 \times 10^{-3}$
Lindano (γ -BHC)	$2,0 \times 10^{-3}$
Manganês	0,1
Mercúrio	0,001
Metoxicloro	0,02

Parâmetro	Limite máximo no extrato mg/L
Nitrato (expresso em N)	10,0
Prata	0,05
Selênio	0,01
Sódio	200,0
Sulfato (expresso em SO ₄)	250,0
Surfactantes	0,5
Toxafeno	5,0 x 10 ⁻³
2,4,5-T	2,0 x 10 ⁻³
2,4,5-TP	0,03
Zinco	5,0