VIVIAN SILVEIRA DOS SANTOS BARDINI

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE
CINZAS DA QUEIMA DA CASCA DE *PINUS* EM OBRAS DE
PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA**

**Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do Título
de Mestre em Engenharia Civil:
Transportes**

Orientador: Prof. Dr. José Leomar Fernandes Júnior

São Carlos

2008

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B246e Bardini, Vivian Silveira dos Santos
Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas
da queima da casca de *pinus* em obras de pavimentação
asfáltica / Vivian Silveira dos Santos Bardini ;
orientador José Leomar Fernandes Júnior. -- São Carlos,
2008.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes e Área de Concentração em
Infra-Estrutura de Transportes) -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2008.

1. Mistura asfáltica. 2. Fíler mineral. 3. Cinzas
residuais de MDF. 4. Reutilização. 5. Superpave.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **VIVIAN SILVEIRA DOS SANTOS BARDINI**

Dissertação defendida e julgada em 21/05/2008 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **JOSE LEOMAR FERNANDES JUNIOR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADA

Prof. Dr. **GLAUCO TULIO PESSA FABBRI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADA

Prof.^a Dr.^a **SANDRA ODA**
(Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ) APROVADA

Prof. Titular **EIJI KAWAMOTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes

Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Sérgio e Nádía, e ao Luis Miguel,
pelo apoio, incentivo e amor

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir que mais uma etapa da minha vida fosse cumprida em paz e tranquilamente.

Ao professor Dr. José Leomar Fernandes Júnior, pela excelente orientação e, principalmente, pela grande amizade.

Aos professores do Departamento de Transportes, da EESC – USP pelos ensinamentos, especialmente ao Dr. Glauco Túlio Pessa Fabbri pelas sugestões e contribuições nesta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Estradas, Antônio Carlos Gigante, Paulo Toyama e, principalmente, João Pereira Filho, pelo auxílio nos ensaios e moldagens.

Aos funcionários do Departamento de Transportes, Magaly Marcondes César, Heloísa Pereira, Elizabeth Ortega, Alexandre Oliveira, Sueli de Lima e Antônio Carlos Mariano

À professora Prof^a. Silvia Claudia Semensato Povinelli por viabilizar a análise do resíduo e disponibilizar a utilização do Laboratório de Saneamento.

À Escola de Engenharia de São Carlos, pelo ensino oferecido desde a graduação em engenharia civil.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela bolsa de estudo concedida.

À pedreira Badeirantes, Betunel e Duratex/unidade Agudos-SP, pelos materiais concedidos para a realização da pesquisa.

Aos amigos Jesner Ildefonso, Marcos Bottene Cunha e Lílían Taís de Gouveia, que auxiliaram diretamente na pesquisa.

Aos amigos do departamento Anna Beatriz Grigolon, Gustavo Manzato, Bruno Vieira, Mateus Dezotti, Paulo Roberto Reschetti, Sérgio Soncim, Ana Paula Furlan e David Alex Arancibia.

Às minhas amigas Samara Tonin, Daniele De Nadai, Veridiana Rosa, Daniele Shimabukuro, Paula Ribeiro, Elisa Adelino, Roberta Gregoracci e Regiane Laveli.

Ao Luis Miguel, por todo amor, carinho, amizade e paciência em todos os momentos.

Aos meus pais, Sérgio Antônio Bardini e Nádia Bardini, por todo apoio, amor e incentivo, acreditando sempre em meu potencial e pela dedicação de toda a vida para me dar a maior herança de todas: o estudo.

Ao meu irmão, Vinícius, por todo companheirismo.

À minha família, Noemia, João, Noeli, Nanci, Maria, Osni, Sidinei, Cleide, Carol e Mateus,
pela confiança e estímulo.

RESUMO

BARDINI, V. S. S. (2008). *Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de Pinus em obras de pavimentação asfáltica*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

O processo industrial para fabricação de MDF – *Medium Density Fiberboard* – utiliza como combustível a casca de madeira *Pinus*, cuja queima gera um resíduo – cinzas – de granulometria fina, que constitui um problema ambiental por conter algumas substâncias em quantidade acima da permitida pela NBR 10004:2004, que o classifica como resíduo de classe II A – não inerte. O objetivo geral desta pesquisa é testar a hipótese de que o resíduo – cinzas podem ser utilizadas como filer em misturas asfálticas, mediante a verificação das propriedades de interesse à engenharia através de ensaios de laboratório: resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, vida de fadiga, dano por umidade induzida, estabilidade e fluência Marshall. Foram realizados ensaios para determinação da massa específica das cinzas – resíduo, inclusive com picnometria de gás hélio. Primeiramente, o filer mineral foi substituído em massa pelo resíduo, optando-se, em função dos resultados preliminares, pela equivalência em volume. As dosagens Marshall, para as misturas contendo resíduo, resultaram em um teor ótimo de ligante praticamente constante, independentemente do teor utilizado (3,5% e 6,0%). Quanto às propriedades mecânicas, nos ensaios de resistência à tração, os maiores valores foram verificados para as misturas contendo 3,5% de filer mineral, enquanto as misturas contendo cinzas – resíduo – apresentaram os menores valores. Os maiores valores de módulo de resiliência foram das misturas contendo maiores teores de filer, sendo que o filer mineral resultou em maior módulo de resiliência do que o resíduo. Na avaliação do dano por umidade induzida, apenas as misturas contendo 6,0% de filer mineral se mostraram não susceptíveis, enquanto que as misturas contendo resíduo foram as que apresentaram maior susceptibilidade. O resíduo também diminuiu a vida de fadiga, sendo a diferença para as misturas com filer mineral mais acentuada para o menor teor de filer. Apesar dos resultados indicarem uma piora de características com a utilização do resíduo, os valores obtidos ainda se situam, na maioria dos casos, acima dos limites mínimos estabelecidos pelas normas técnicas, encorajando pesquisas adicionais, principalmente em função do problema ambiental representado pelas cinzas da queima da casca de *Pinus*.

Palavras chave: mistura asfáltica; filer mineral; cinzas residuais de MDF; reutilização; Superpave.

ABSTRACT

BARDINI, V. S. S. (2008). Study of the technical feasibility of the use of ash of the *Pinus*' burning in hot-mix asphalt. Master Thesis (Mastering) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

The industrial production of MDF – *Medium Density Fiberboard* – uses *Pinus* wood skin as a fuel, which, after the burning process, generates a fine gradation residue, an ash that is an environmental problem due to the content of some substances, above the quantity allowed by the NRB 10004:2004, and it is classified as a class II-A – non-inert product. The general purpose of this work is to test the hypothesis that the residue can be use as a filler in hot-mix asphalt, through the evaluation of technological properties by laboratory tests such as indirect tension, resilient modulus, fatigue life, moisture susceptibility, Marshall Stability and creep. The evaluation of specific gravity of the residue was done by the gas pycnometer method. Initially, the substitution of the mineral filler by the residue was done in terms of weight, but the preliminary results showed that the best option was the substitution in terms of volume. The Marshall mix design for mixtures containing the residue resulted in a binder content approximately constant for both residue contents considered in this work (3.5% and 6.0%). The indirect tension test results showed higher values for mixtures containing 3.5% of mineral filler, being the lowest values associated to mixtures that use residue. The higher the filler content, the higher the resilient modulus and mixtures with mineral filler presented higher resilient modulus values. Only the mixture with 6.0% of mineral filler passed the moisture susceptibility test, and mixtures with residue presented higher moisture susceptibility. The residue also weakened the fatigue life, being the difference higher for mixtures with lower filler content. Although the results show a worsening of asphalt mixtures properties due to the use of the residue as a filler, for most of the obtained results the value remained above the minimum acceptable by technical standards, encouraging further researches on this subject, mainly due to the environmental problem associated to the burning of *Pinus* wood skin.

Key words: hot-mix asphalt; mineral filler; MDF bottom ashes; reuse; Superpave.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	2
1.2 OBJETIVOS	4
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
CAPÍTULO 2 – CARACTERÍSTICAS DA FABRICAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA	7
2.1 INTRODUÇÃO	7
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PAINÉIS DE MADEIRA	10
2.3 O MDF (<i>Medium Density Fiberboard</i>)	11
2.3.1 Características do MDF	13
2.3.2 Tipos de MDF	16
2.3.3 Usos e aplicações	17
2.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE MDF	18
2.5 GERAÇÃO DAS CINZAS DA QUEIMA DA CASCA DO <i>Pinus</i>	21
CAPÍTULO 3 – IMPORTÂNCIA DO FÍLER PARA AS MISTURAS ASFÁLTICAS	25
3.1 MISTURAS ASFÁLTICAS	25
3.2 DEFINIÇÃO DE FÍLER	26
3.3 INTERAÇÕES LIGANTE ASFÁLTICO-FÍLER	28
CAPÍTULO 4 – MÉTODO BAILEY DE SELEÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA MISTURAS ASFÁLTICAS	35
4.1 PRINCÍPIOS DO MÉTODO BAILEY	38
4.2 SELEÇÃO GRANULOMÉTRICA	39
4.3 ANÁLISE DA MISTURA	40
CAPÍTULO 5 – ESPECIFICAÇÕES SUPERPAVE	43
5.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS	44
5.2 GRANULOMETRIA	46
5.3 REQUISITOS VOLUMÉTRICOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS	49
CAPÍTULO 6 – MATERIAIS E MÉTODOS	53
6.1 MATERIAIS UTILIZADOS	53
6.1.1 Ligante Asfáltico	53
6.1.2 Agregado	54
6.1.3 Cinzas – Resíduo	55
6.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	56
6.2.1 Determinação da massa específica solta do agregado graúdo	56
6.2.2 Determinação da massa específica compactada do agregado fino	58
6.2.3 Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo	59
6.2.4 Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado miúdo	62
6.2.5 Determinação da massa específica real do filer	66
6.3 PICNOMETRIA DE GÁS	68

6.4 DOSAGEM MARSHALL	71
6.4.1 Propriedades Volumétricas	75
6.4.2 Estabilidade e Fluência Marshall	78
6.5 DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA E ABSORÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS ATRAVÉS DO MÉTODO RICE	79
6.6 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	82
6.6.1 Ensaio de Módulo de Resiliência	82
6.6.2 Resistência à Tração	85
6.6.3 Ensaio de Fadiga	87
6.6.4 Dano por Umidade Induzida	91
6.7 ENSAIOS AMBIENTAIS	93
6.7.1 Ensaio de massa bruta	94
6.7.2 Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos	95
6.7.3 Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos	95
CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	97
7.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	97
7.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO	97
7.3 CURVA GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	98
7.4 DOSAGEM MARSHALL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	101
7.5 ENSAIOS EXPLORATÓRIOS	110
7.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	113
7.7 MÓDULO DE RESILIÊNCIA	114
7.8 RELAÇÃO MR/RT	115
7.9 VIDA DE FADIGA	116
7.10 DANO POR UMIDADE INDUZIDA	124
7.11 ANÁLISE MECANÍSTICA	126
7.12 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL	130
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
8.1 CONCLUSÕES	133
8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
APÊNDICE – EXEMPLO DE SELEÇÃO	149
GRANULOMÉTRICA PELO MÉTODO BAILEY	149
ANEXO A – ENSAIO DE PICNOMETRIA DE GÁS HÉLIO	159
ANEXO B – ANÁLISE DO RESÍDUO	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Classificação dos painéis à base de madeira.....	10
Figura 2.2.	Consumo Mundial de MDF – 2004.....	12
Figura 2.3.	Painéis de MDF (<i>Medium Density Fiberboard</i>).....	14
Figura 2.4.	Aplicação doméstica do MDF.....	18
Figura 2.5.	Etapas de Produção do MDF.....	18
Figura 2.6.	Processo de Produção do MDF.....	21
Figura 2.7.	Multiciclones para Captação das Cinzas.....	22
Figura 2.8.	Depósito das Cinzas – Resíduo.....	23
Figura 5.1.	Especificação Superpave: zona de restrição e pontos de controle.....	48
Figura 6.1.	Granulometria dos Agregados – Especificação Superpave.....	55
Figura 6.2.	Granulometria dos Agregados.....	55
Figura 6.3.	Cinzas Resultantes da Queima da Casca de <i>Pinus</i>	56
Figura 6.4.	Cilindro Utilizado no Ensaio de Determinação da Massa Específica Solta	58
Figura 6.5.	Cilindro Utilizado no Ensaio de Determinação da Massa Específica Compactada.....	59
Figura 6.6.	Secagem Superficial do Agregado Graúdo.....	61
Figura 6.7.	Passagem de Corrente de Ar Quente.....	63
Figura 6.8.	Condição Saturada Seca Superficialmente.....	64
Figura 6.9.	Frasco de Lê Chatelier.....	67
Figura 6.10.	Picnômetro de gás hélio.....	69
Figura 6.11.	Massas utilizadas para calibração do sistema.....	70
Figura 6.12.	Curva Viscosidade Brookfield versus Temperatura do Ligante Asfáltico.....	72
Figura 6.13.	Compactador Marshall.....	75
Figura 6.14.	Prensa para Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall.....	79
Figura 6.15.	Preparação da Amostra para o Ensaio de Absorção.....	80
Figura 6.16.	Conjunto kitassato modificado, Água e Mistura Asfáltica.....	80
Figura 6.17.	Estado de Tensões no Carregamento Diametral.....	86
Figura 6.18.	Esquema do ensaio de fadiga.....	88
Figura 7.1.	Curva Granulométrica Bailey (3,5% de fíler).....	99
Figura 7.2.	Curva Granulométrica Acima da Zona de Restrição (3,5% de fíler).....	100
Figura 7.3.	Curva Granulométrica Acima da Zona de Restrição (6,0% de fíler).....	101
Figura 7.4.	Dosagem Marshall – Densidade aparente <i>versus</i> teor de asfalto (Método Bailey).....	102
Figura 7.5.	Dosagem Marshall – Volume de vazios <i>versus</i> teor de asfalto (Método Bailey).....	103
Figura 7.6.	Dosagem Marshall – Vazios do agregado mineral <i>versus</i> teor de asfalto (Método Bailey).....	103
Figura 7.7.	Dosagem Marshall – Relação betume-vazios <i>versus</i> teor de asfalto (Método Bailey).....	103
Figura 7.8.	Dosagem Marshall – Estabilidade <i>versus</i> teor de asfalto (Método Bailey).....	104
Figura 7.9.	Dosagem Marshall – Fluência <i>versus</i> teor de asfalto (Método Bailey).....	104

Figura 7.10. Dosagem Marshall – Densidade aparente <i>versus</i> teor de asfalto (3,5% de filer).....	105
Figura 7.11. Dosagem Marshall – Volume de vazios <i>versus</i> teor de asfalto (3,5% de filer).....	105
Figura 7.12. Dosagem Marshall – Vazios do agregado mineral <i>versus</i> teor de asfalto (3,5% de filer).....	106
Figura 7.13. Dosagem Marshall – Relação betume-vazios <i>versus</i> teor de asfalto (3,5% de filer).....	106
Figura 7.14. Dosagem Marshall – Estabilidade <i>versus</i> teor de asfalto (3,5% de filer).....	106
Figura 7.15. Dosagem Marshall – Fluência <i>versus</i> teor de asfalto (3,5% de filer).....	107
Figura 7.16. Dosagem Marshall – Densidade aparente <i>versus</i> teor de asfalto (6,0% de filer).....	108
Figura 7.17. Dosagem Marshall – Volume de vazios <i>versus</i> teor de asfalto (6,0% de filer).....	108
Figura 7.18. Dosagem Marshall – Vazios do agregado mineral <i>versus</i> teor de asfalto (6,0% de filer).....	108
Figura 7.19. Dosagem Marshall – Relação betume-vazios <i>versus</i> teor de asfalto (6,0% de filer).....	109
Figura 7.20. Dosagem Marshall – Estabilidade <i>versus</i> teor de asfalto (6,0% de filer).....	109
Figura 7.21. Dosagem Marshall – Fluência <i>versus</i> teor de asfalto (6,0% de filer).....	109
Figura 7.22. Variação da resistência tração em função da quantidade e do tipo de filer.....	113
Figura 7.23. Variação do módulo de resiliência em função da quantidade e tipo de filer.....	115
Figura 7.24. Relação MR/RT em função da quantidade e do tipo de filer.....	116
Figura 7.25. Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova contendo 3,5% de filer mineral.....	117
Figura 7.26. Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova contendo 3,5% de filer mineral.....	118
Figura 7.27. Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova contendo 6,0% de filer mineral.....	119
Figura 7.28. Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova contendo 6,0% de filer mineral.....	119
Figura 7.29. Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova contendo 3,5% de resíduo.....	120
Figura 7.30. Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova contendo 3,5% de resíduo.....	121
Figura 7.31. Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova contendo 6,0% de resíduo.....	122
Figura 7.32. Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova contendo 6,0% de resíduo.....	122
Figura 7.33. Número de ciclos em função da diferença de tensões para corpos-de-prova contendo diferentes quantidades e tipos de filer.....	123
Figura 7.34. Número de ciclos em função da deformação resiliente para corpos-de-prova contendo diferentes quantidades e tipos de filer.....	124
Figura 7.35. Valores de resistência a tração retida (RTR) das misturas.....	125

Figura 7.36. Valores de módulo de resiliência retida (RTR) das misturas.....	126
Figura 7.37. Esquema da estrutura e carregamentos da simulação para análise estrutura mecânica.....	128
Figura 7.38. Vida de fadiga das diferentes misturas para a estrutura 1.....	129
Figura 7.39. Vida de fadiga das diferentes misturas para a estrutura 2.....	130
Figura 7.40. Variação da estabilidade em função da quantidade e tipo de filer.....	131
Figura 7.41. Variação da fluência em função da quantidade e tipo de filer.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Grupos e principais tipos de painéis.....	8
Tabela 2.2 - Classificação das chapas de fibras	11
Tabela 5.1 - Especificações Superpave: requisitos das propriedades de consenso	46
Tabela 5.2 - Pontos de controle conforme o Diâmetro Máximo Nominal	48
Tabela 5.3 - Zona de restrição de acordo com o Diâmetro Máximo Nominal.....	48
Tabela 5.4 - Requisitos de VAM da especificação Superpave	50
Tabela 5.5 - Fatores de graduação para correção do VAM	51
Tabela 5.6 - Requisitos Superpave para RBV	52
Tabela 6.1 - Caracterização do Ligante Asfáltico CAP 50/70	53
Tabela 6.2 - Granulometria dos Agregados	54
Tabela 6.3 - Capacidade do Recipiente para Determinação da Massa Específica Solta.....	57
Tabela 6.4 - Quantidade do Material da Amostra para Determinação da Densidade do Agregado Graúdo	60
Tabela 6.5 - Temperaturas do Ligante Asfáltico, do Agregado e de Compactação	72
Tabela 7.1 - Características Físicas dos Agregados	97
Tabela 7.2 - Valores de densidade real do resíduo – cinzas	98
Tabela 7.3 - Curva Granulométrica Bailey (3,5% de filer)	99
Tabela 7.4 - Curva Granulométrica Acima da Zona de Restrição (3,5% de filer).....	100
Tabela 7.5 - Curva Granulométrica Acima da Zona de Restrição (6,0% de filer).....	101
Tabela 7.6 - Dosagem Marshall (Método Bailey – 3,5% de filer)	102
Tabela 7.7 - Dosagem Marshall (3,5% de filer)	105
Tabela 7.8 - Dosagem Marshall (6,0% de filer)	107
Tabela 7.9 - Propriedades volumétricas dos corpos-de-prova contendo 3,5% de resíduo (em massa)	111
Tabela 7.10 - Propriedades volumétricas dos corpos-de-prova contendo 6,0% de resíduo (em massa)	111
Tabela 7.11 - Volume dos corpos-de-prova contendo diferentes tipos de filer	112
Tabela 7.12 - Propriedades volumétricas dos corpos-de-prova contendo 3,5% de resíduo (em volume)	112
Tabela 7.13 - Propriedades volumétricas dos corpos-de-prova contendo 6,0% de resíduo (em volume)	112
Tabela 7.14 - Valores médios de resistência à tração	113
Tabela 7.15 - Valores médios de módulo de resiliência	114
Tabela 7.16 - Relação MR/RT em função da quantidade e do tipo de filer	116
Tabela 7.17 - Resultados dos ensaios de fadiga para os corpos-de-prova contendo 3,5% de filer mineral	117
Tabela 7.18 - Resultados dos ensaios de fadiga para os corpos-de-prova contendo 6,0% de filer mineral	118
Tabela 7.19 - Resultados dos ensaios de fadiga para os corpos-de-prova contendo 3,5% de resíduo	120
Tabela 7.20 - Resultados dos ensaios de fadiga para os corpos-de-prova contendo 6,0% de resíduo	121

Tabela 7.21 - Resultados dos ensaios de dano por umidade induzida – resistência à tração..	124
Tabela 7.22 - Resultados dos ensaios de dano por umidade induzida – módulo de resiliência.....	125
Tabela 7.23 - Características das camadas das duas estruturas utilizadas na análise mecânica	127
Tabela 7.24 - Vida de fadiga das diferentes misturas para a estrutura 1	129
Tabela 7.25 - Vida de fadiga das diferentes misturas para a estrutura 2	129
Tabela 7.26 - Valores médios de estabilidade Marshall	130
Tabela 7.27 - Valores médios de fluência Marshall	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Porcentagem passada na peneira 0,30mm e retida na peneira 0,075 mm
A	Massa da amostra de agregado gráudo seca em estufa determinada ao ar; Porcentagem passada na peneira 4,76 mm e retida na peneira 0,30 mm; Massa da amostra seca
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
Abs _f	Absorção de água do agregados finos
Abs _g	Absorção de água do agregado gráudo
A _{bs}	Porcentagem de ligante absorvido por massa de agregado
ABIPA	Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Af	Massa da amostra de agregado fino, seca em estufa, determinada ao ar
AF	Contribuição do pó de pedra
AF _{ft}	Quantidade final de agregado fino na mistura
Ag	Massa da amostra de agregado gráudo, seca em estufa, determinada ao ar
AG	Proporção de agregados gráudos; Quantidade de agregado gráudo na mistura
AG _p	Quantidade de agregados na mistura
AG ₁	Contribuição da pedra1
AG ₂	Contribuição do pedrisco
AG _{1f}	Quantidade corrigida de pedra 1 na mistura
AG _{2f}	Quantidade corrigida de pedrisco na mistura
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
b	Porcentagem de asfalto, em peso, na amostra total
B	Massa do picnômetro cheio de água
Bg	Massa da amostra de agregado gráudo determinada ao ar

BTU	Unidade térmica britânica
C	Concentração volumétrica do sistema filer-betume
C _g	Massa da amostra de agregado graúdo determinada submersa na água
CAF	Contribuição total dos agregados finos na mistura
CAG	Contribuição total dos agregados graúdos na mistura
CAG ₁	Contribuição da pedra 1 na mistura
CAG ₂	Contribuição do pedrisco na mistura
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CAP _p	Quantidade do ligante na mistura
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
Cs	Concentração crítica de filer
D	Massa do picnômetro preenchido com água; Diâmetro do corpo-de-prova
Dap	Densidade aparente do corpo-de-prova
Db	Densidade do asfalto
Df	Densidade do filer; Massa do picnômetro com agregado fino e água
DNER	Departamento nacional de estradas de rodagem
DMN	Diâmetro máximo nominal
DMT	Densidade máxima teórica da mistura
DMT _R	Densidade máxima teórica determinada pelo Método Rice
E	Estabilidade; Massa do conjunto picnômetro, água e amostra
ESALs	<i>Equivalet Single Axle Loads</i>
f	Porcentagem passada na peneira 0,075 mm; Porcentagem de filer, em peso, na amostra total
F	Fluência; Carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova; Carga aplicada; Carga de ruptura

FAF	Proporção fina dos agregados finos
FC	Fator de controle
FF	Quantidade passante na peneira 0,075mm do agregado fino
FG ₁	Quantidade passante na peneira 0,075mm da pedra 1
FG ₂	Quantidade passante na peneira 0,075mm do pedrisco
FM	Quantidade de filer na mistura calculada
FM _{dês}	Quantidade de filer desejado na mistura
FR	Chapas de MDF resistentes ao fogo
g	Porcentagem passada na peneira 9,5 mm e retida na peneira 4,76 mm
G	Porcentagem retida na peneira 9,5 mm
GAF	Proporção graúda dos agregados finos
G _{sb1}	Massa específica da pedra 1
G _{sb2}	Massa específica do pedrisco
H	Altura do corpo-de-prova
HD	Chapas de MDF de maior resistência mecânica
IDOT	Departamento de Transportes de Illinois
Kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
m	Módulo de riqueza em asfalto; Metro
Ma	Massa ao ar do corpo-de-prova
M _{cc}	Massa do cilindro com agregado graúdo
M _{cf}	Massa do cilindro com agregado fino
M _{cv}	Massa do cilindro vazio
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>

ME	Metodologia de Ensaio
<i>MEC</i>	Massa específica compactada do agregado fino
MEE_f	Massa específica escolhida do agregado fino
MEE_g	Massa específica escolhida de cada agregado graúdo
MEE_{g1}	Massa específica escolhida da pedra 1
MEE_{g2}	Massa específica escolhida do pedrisco
MEM	Massa específica da mistura
<i>MES</i>	Massa específica solta do agregado graúdo
MES_d	Quantidade desejada da massa específica solta
M_{filer}	Massa do material
M_i	Massa imersa do corpo-de-prova
MR	Módulo de resiliência
NBR	Norma Brasileira
N_D	Número de aplicações de carga até a ruptura do corpo-de-prova, em função da deformação resiliente
N_T	Número de aplicações de carga até a ruptura do corpo-de-prova, em função da diferença de tensões
PAG	Proporção dos agregados graúdos
P_{ca}	Porcentagem de cimento asfáltico
PCF_1	Quantidade contribuinte da peneira 0,075 mm da pedra 1
PCF_2	Quantidade contribuinte da peneira 0,075 mm do pedrisco
PCF_f	Quantidade contribuinte da peneira 0,075 mm do agregado fino
PCP	Peneira de controle primário
PCP_p	Quantidade passada na peneira de controle primário
PCS	Peneira de controle secundário
PCS_p	Quantidade passada na peneira de controle secundário

PCT	Peneira de controle terciário
PCT _p	Quantidade passada na peneira de controle terciário
PFAF	Proporção fina dos agregados finos
PFG ₁	Quantidade de finos na pedra 1
PFG ₂	Quantidade de finos no pedrisco
PGAF	Proporção graúda dos agregados finos
PGF	Quantidade de graúdos no agregado fino
PM	Peneira média
PM _p	Quantidade passada na peneira média
PVC	Poli Cloreto de Vinila
QAF	Quantidade de pó de pedra retida na PCP
QAG ₁	Quantidade de pedra 1 passante na PCP
QAG ₂	Quantidade de pedrisco passante na PCP
RBV	Relação betume-vazios
RT	Resistência à tração
RTR	Resistência à tração retida
RTC	Resistência à tração após o condicionamento
S	Superfície específica do agregado
S _f	Massa da amostra de agregado fino na condição saturada seca superficialmente
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
Superpave	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
T	Temperatura
T _{ca}	Teor de cimento asfáltico
T' _{ca}	Teor de cimento asfáltico corrigido
%b	Porcentagem de asfalto, em peso, na amostra total

$\%f$	Porcentagem de filler, em peso, na amostra total
UR	Chapas de MDF resistentes à umidade
VAG	Vazios no agregado graúdo
VAM	Vazios no agregado mineral
Vb	Volume de asfalto nos poros
Vc	Volume do cilindro
V _{ca}	Volume de vazios preenchido pelo ligante asfáltico
Vf	Volume real de filler
V _{desl}	Volume do líquido deslocado
Vv	Volume de vazios
Δ	Deformação
$\Delta\sigma$	Diferença de tensões no centro do corpo-de-prova
$\Delta\varepsilon$	Diferença de deformações no centro do corpo-de-prova
δ_{am}	Densidade real do agregado mineral
ε_i	Deformação resiliente
ε_t	Deformação específica recuperável
μ	Coeficiente de Poisson.
ρ_{real}	Massa específica real do filler
ρ	Massa específica real do agregado fino
$\rho_{\text{água}}$	Massa específica da água
ρ_{ap}	Massa específica aparente do agregado
ρ_{apf}	Massa específica aparente do agregado fino
ρ_{apg}	Massa específica aparente do agregado graúdo
ρ_{AG}	Massa específica dos agregados
ρ_{CAP}	Massa específica do ligante asfáltico

ρ_{ef}	Massa específica efetiva do agregado
ρ_{rf}	Massa específica real do agregado fino
ρ_{rfiler}	Massa específica real do filer
ρ_{rg}	Massa específica real do agregado graúdo
σ_c	Tensão de compressão
σ_t	Tensão de tração
k_1, k_2, k_3, k_4	Parâmetros determinados por regressão no ensaio de vida de fadiga

*“Não basta saber, deve-se também aplicar.
Não é suficiente querer, deve-se também fazer.”
Johann Wolfgang von Goethe*

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Desenvolvimento sustentável é atender às necessidades da geração atual sem comprometer as futuras gerações no atendimento das suas próprias necessidades. Essa preocupação com o meio ambiente traz a necessidade de que as empresas compatibilizem o desenvolvimento econômico com a preservação do meio ambiente.

Todas as empresas devem buscar não só a otimização dos recursos utilizados, mas também a minimização dos impactos ambientais decorrentes dos seus processos, ou seja, os aspectos ambientais são de fundamental importância para o planejamento estratégico de uma empresa.

Impacto ambiental é toda a ação ou atividade de uma organização, quer adversa ou benéfica, que produz alterações em todo o meio ambiente ou apenas em alguns de seus componentes. Toda atividade econômica industrial gera resíduos e o ideal é a redução dessa geração através de tecnologias limpas, com processos que reduzam a emissão de poluentes, mas a recuperação e reciclagem desses resíduos, para serem utilizados em outros processos ou produtos, também constituem alternativas que devem ser desenvolvidas.

O crescimento industrial interfere no meio ambiente, principalmente através da extração de matéria-prima, que após passar pelo processo produtivo das empresas gera resíduos, que muitas vezes acabam dispostos em aterros não monitorados. Assim, as empresas que optam por atender à legislação ambiental devem gerenciar seus resíduos, não como lixo, mas como um desperdício passível de eliminação ou redução e, também, como fonte de matéria-prima para novos produtos.

O desenvolvimento sustentável deve ser tomado como meta para que uma nação possa crescer e evoluir, garantindo uma vida adequada às gerações futuras. Com base nesse conceito e na utilização de técnicas de reuso e reciclagem, muitos dos rejeitos, outrora considerados lixo, podem se tornar matéria-prima, fazendo com que a exploração dos recursos naturais e o montante de resíduo descartado no meio ambiente diminuam.

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O MDF (Medium Density Fiberboard) é uma chapa fabricada a partir da aglutinação de fibras de madeira com resinas sintéticas e ação conjunta de temperatura e pressão. É um produto relativamente novo, tendo sido fabricado pela primeira vez no início dos anos 60 nos Estados Unidos. Em meados da década de 70 chegou à Europa, quando passou a ser produzido na antiga República Democrática Alemã e, posteriormente (1977), foi introduzido na Europa Ocidental através da Espanha. No Brasil, a primeira indústria iniciou sua produção no segundo semestre de 1997.

O dinamismo do mercado interno, o potencial de oferta de matéria-prima e as dimensões do Brasil colocam a indústria nacional de painéis de madeira em situação privilegiada para expansão. A indústria de painéis é de relevante importância para a economia brasileira, não só pela geração de empregos, como também pelo dinamismo que irradia, especialmente para os setores moveleiros e de construção civil.

Efetivamente o mercado brasileiro de produtos de origem florestal passou a ser extremamente atrativo, em face das altas taxas de crescimento apresentadas. Segundo a ABIPA – Associação

Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira, a produção de MDF nos anos de 2005 e 2006 foi, respectivamente, de 1,4 e 1,7 milhões de m³.

O processo industrial para fabricação de MDF utiliza como combustível a queima da casca de madeira *Pinus*. Após a queima, é gerado um resíduo, cinzas, de granulometria fina, que se torna um grave problema ambiental, pois apresenta algumas substâncias em quantidade acima da permitida pela NBR 10004:2004, sendo classificada como resíduo classe II A– não inerte. A produção do resíduo dessa queima é de, aproximadamente, 2,57 kg de cinzas para a produção de 1m³ de chapas de MDF, com geração anual estimada de 4300 toneladas.

O reaproveitamento das cinzas no reuso ou reciclagem traz grandes benefícios para o meio ambiente e para as indústrias, contribuindo para a diminuição da poluição e a quantidade de recursos naturais utilizados, além de minimizar a problemática das indústrias com o destino final do resíduo, pois a remoção das cinzas para aterros industriais contribui para aumentar o custo final do produto, devido ao custo do transporte e ao pagamento de taxas para disposição.

A malha rodoviária nacional, segundo uma pesquisa da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2007), em seus diversos níveis (federal, estadual e municipal), é de aproximadamente 1,6 milhões de quilômetros, porém somente 196 mil quilômetros estão pavimentados, ou seja, pouco mais de 10% do total. Com o potencial que o Brasil possui no setor de estradas, a grande quantidade de resíduo gerado e a expansão do mercado de painéis de madeira motivaram o estudo da inserção das cinzas em misturas asfálticas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é testar a hipótese de que as cinzas da queima da casca de *Pinus* podem ser utilizadas como agregado fino em misturas asfálticas, mediante a avaliação de propriedades de interesse à engenharia, através de ensaios de laboratório.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estudar o efeito de diferentes porcentagens de resíduo utilizado em substituição ao agregado;
- Avaliar o desempenho das misturas asfálticas contendo o resíduo quanto às propriedades mecânicas e comparar com as misturas de “controle” (sem resíduo).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 8 capítulos, incluindo esta introdução (Capítulo 1). O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica que aborda as vantagens dos painéis de madeira, dando ênfase ao MDF, suas características, utilizações, processo de fabricação, dentro do qual está a geração do resíduo estudado, e um panorama do mercado atual desse segmento.

O Capítulo 3 destaca a importância do filler mineral para o desempenho de misturas asfálticas, abordando, particularmente, a interação do filler com o ligante asfáltico. O Capítulo 4 descreve os princípios do Método Bailey de seleção granulométrica, que analisa as misturas por três parâmetros relacionados aos agregados pétreos: proporção de agregados graúdos, proporção graúda dos agregados finos, proporção fina dos agregados finos. No Capítulo 5 faz-se uma

revisão dos conceitos das especificações Superpave, particularmente no que diz respeito às propriedades dos agregados, à granulometria e aos requisitos volumétricos das misturas asfálticas.

O Capítulo 6 trata da caracterização dos materiais utilizados - ligante asfáltico, agregados e resíduo - da definição da curva granulométrica através do método Bailey, da dosagem e compactação das misturas asfálticas através do método Marshall, dos ensaios de caracterização mecânica das misturas asfálticas (resistência à tração, módulo de resiliência, vida de fadiga e dano por umidade induzida) e dos ensaios ambientais necessários para a avaliação do resíduo utilizado. No Capítulo 7 são apresentados os resultados e as análises realizadas e no Capítulo 8 são feitas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros com a utilização das cinzas da queima da casca de *Pinus* em misturas asfálticas.

CAPÍTULO 2 – CARACTERÍSTICAS DA FABRICAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA

2.1 INTRODUÇÃO

A utilização de produtos de madeira e seus derivados apresenta uma série de vantagens em relação a outros materiais de construção: é um material renovável, disponível abundantemente, biodegradável ou durável, dependendo do tratamento, reciclável e que imobiliza carbono proveniente da atmosfera em sua estrutura. Outras vantagens da madeira são a alta resistência em relação à massa específica e a boa trabalhabilidade.

Para produzir produtos madeireiros consome-se menor quantidade de energia em comparação à produção de aço, plástico e materiais à base de cimento. A grande vantagem da utilização de painéis a base de madeira é elucidada quando comparamos sua utilização com materiais não-renováveis, como alvenaria, aço, plástico e alumínio. Um consistente parâmetro de comparação é a demanda de energia para a extração, produção e transporte de cada material. A utilização de uma tonelada de MDF, no fechamento de paredes, resulta numa necessidade líquida de energia é de 8,49 milhões de BTU ($9 \cdot 10^9$ J), a utilização de alumínio demandará 34,08 milhões de BTU ($36 \cdot 10^9$ J) e por fim, a utilização de alvenaria para o mesmo fim, 183,28 milhões de BTU ($190 \cdot 10^9$ J) (KOCH, 1992).

Por sua vez, a utilização de painéis a base de madeira permite manter muitas vantagens da madeira sólida, adicionando outras como: dimensões dos painéis não estritamente relacionadas às dimensões das árvores; pode-se agregar valor a materiais de baixa aceitação

como resíduos de serrarias e desbastes; possibilidade de eliminar muitos defeitos provenientes da anatomia da árvore como nós, medulas e desvios da grã, conferindo ao produto final homogeneidade muito maior que a encontrada na madeira serrada (MALONEY, 1989).

Os painéis a base de madeira apresentam uma série de vantagens inerentes a esta matéria-prima, como renovabilidade, boa resistência em relação à massa específica, elevada disponibilidade, reciclabilidade, capacidade de imobilizar em sua massa grande quantidade de gás carbônico proveniente da atmosfera e demandam menor quantidade de energia para produção, transporte e instalação (SOCIETY OF WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY, 1997).

A tecnologia desenvolvida para a fabricação de painéis reconstituídos permite utilizar, como matéria-prima, subprodutos da indústria madeireira, por exemplo, costaneiras ou madeira de diâmetro reduzido proveniente de desbastes, agregando valor a este material e diminuindo a demanda de madeira industrial e a pressão sobre os recursos naturais (MALONEY, 1989).

Os painéis de madeira são distribuídos em dois grandes grupos denominados sólidos e reconstituídos. Os mais importantes tipos de painéis encontrados em cada um dos grupos podem ser visualizados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Grupos e principais tipos de painéis

Sólidos	Reconstituídos
	Aglomerado
Compensados	MDF
	OSB
	Chapa de Fibra

Observa-se mundialmente, com a substituição de florestas nativas por florestas plantadas, um aumento expressivo na produção e consumo de painéis a base de madeira. Entre eles, destaca-se o MDF (*Medium Density Fiberboard*), um dos painéis à base de madeira mais avançados tecnologicamente. Os painéis MDF são formados por processos de prensagem a seco e utilizam como matéria-prima madeira desfibrada termomecanicamente com a adição de resina sintética, geralmente uréia-formaldeído, além de outros aditivos em menor quantidade. Estes painéis são prensados a quente e sua densidade varia de 500 a 800 kg/m³.

Os produtos derivados de madeira é uma proposta interessante na ampliação dos materiais a serem empregadas na indústria da construção civil, moveleira e outras. O Brasil apresenta condições favoráveis para se tornar um importante produtor mundial de painéis de madeira, isto porque possui tecnologia que possibilita o uso de resíduos de processamento da madeira.

Os principais países produtores de painéis de madeira encontram-se na América do Norte e Europa, que são também os principais consumidores, em que a única exceção é o compensado, onde países do sudeste asiático é destaque. O Brasil tem uma pequena participação, tanto na produção nacional como no mercado internacional. O único destaque é a chapa dura de fibra e, de certa forma, o compensado de madeira tropical. Enquanto alguns produtos de madeira estão em declínio ou crescendo a taxas bastante reduzidas, a produção mundial de painéis vem crescendo a taxas médias superiores a 3% ao ano e, em alguns países, como é o caso do Brasil projetam-se para a próxima década taxas anuais de crescimento acima de 6%.

Uma grande parte dos novos investimentos em unidades de produção de painéis está sendo orientada para países emergentes. Em princípio, disponibilidade de matéria-prima e existência

de um mercado local têm sido fatores importantes no processo decisivo para a localização dos novos e substanciais investimentos. O crescimento das indústrias de painéis de madeira vem sendo feito por empresas nacionais e também por estrangeiras.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PAINÉIS DE MADEIRA

São apresentadas na literatura muitas formas de classificação dos painéis a base de madeira. A grande maioria classifica estes produtos segundo a transformação da madeira em lâminas, partículas ou fibras; tipo de processo seco ou úmido e densidade final do produto.

A Figura 2.1 mostra uma forma de classificação dos painéis à base de madeira, baseada em Suchsland & Woodson (1987).

Figura 2.1. Classificação dos painéis à base de madeira

Segundo a Fao (1958), as chapas de fibras são classificadas de acordo com o uso de pressão ou não no processo de fabricação, bem como com a densidade das chapas prontas, que pode ser visto na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Classificação das chapas de fibras

Chapa de Fibra		Densidade
Não-comprimida	Chapa isolante semi-rígida	0,02 - 0,15
	Chapa isolante rígida	0,15 - 0,40
Comprimida	Chapa de fibra de média densidade	0,40 - 0,80
	Chapa dura	0,80 - 1,20
	Chapa dura especialmente densificada	1,20 - 1,45

Fonte: FAO (1958)

2.3 O MDF (*Medium Density Fiberboard*)

Segundo o Forest Products Laboratory (1999), a tecnologia utilizada na manufatura do MDF é uma combinação dos processos produtivos a seco das chapas de partículas e processo úmido das chapas duras de fibras. A determinação das propriedades físicas e mecânicas do material tem o objetivo definir as aplicações mais adequadas do produto.

Há diversas normas que estabelecem valores referenciais procurando definir um padrão de qualidade na produção de MDF, porém não há norma brasileira definindo uma classificação dos painéis MDF. A densidade é uma característica física importante, pois permite classificar o painel de madeira com base no mercado.

Tanto em nível nacional como internacional os painéis de madeira continuarão crescendo em taxas superiores aos demais produtos de madeira. A produção de painéis ainda irá pertencer aos principais produtores anuais por um tempo, mas o crescimento da produção nos países em

desenvolvimento será decorrência de uma série de fatores, entre elas a disponibilidade de matéria-prima em quantidade e qualidade adequada, a competitividade resultante de menores custos operacionais, e a abertura destes novos mercados.

É um produto relativamente novo foi fabricado pela primeira vez ao início dos anos 60 nos Estados Unidos. Em meados da década de 70 chegou à Europa, quando passou a ser produzido na antiga República Democrática Alemã e, posteriormente (1977) foi introduzido na Europa Ocidental através da Espanha.

Pode-se verificar que a produção mundial duplicou entre 1996 e 2000, o que corresponde a um crescimento médio anual em torno de 18%. Entre os maiores produtores de MDF destacam-se Estados Unidos, Alemanha e China, que juntos correspondem a 39% do volume produzido. Durante este período foram acima de 30% ao ano os acréscimos de produção verificados na Alemanha, França, China e Brasil. A produção brasileira no ano de 2000 representou 2% do volume mundial. A Figura 2.2 mostra a distribuição do consumo mundial de MDF no ano de 2004.

Figura 2.2. Consumo Mundial de MDF – 2004

Fonte: <http://www.abipa.org.br> (2007)

No Brasil a primeira indústria iniciou sua produção no segundo semestre de 1997 pela empresa Duratex, unidade Agudos/SP, posteriormente, começaram a operar Tafisa (final de 1998), localizada em Pien/PR, unidade Masisa (início de 2001), situada em Ponta Grossa/PR e Placas do Paraná (final de 2001), localizada em Jaguariaíva/PR.

A produção nacional, que em 2001 atingiu 609 mil m³, estava voltada totalmente para o mercado interno e ainda não foi suficiente para eliminar as importações que, naquele ano, atingiram 24 mil m³, correspondente a 3,8% do consumo.

Segundo a ABIPA – Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira, a produção de MDF nos últimos dois anos, de 2005 e 2006, foi respectivamente de 1,4 e 1,7 milhões de m³. As empresas fabricantes do segmento têm uma capacidade nominal instalada de 2,0 milhões de m³/ano.

O Brasil tem grandes perspectivas de se tornar um grande produtor de painéis. Os novos perfis dos painéis reconstituídos no Brasil, representado atualmente pelo MDF poderão mudar o perfil de consumo no Brasil.

2.3.1 Características do MDF

Os painéis MDF são definidos pela ASTM-D1554 (1974) e por Maloney (1996) como “painéis fabricadas a seco, feitos com fibras lignocelulósicas combinadas com uma resina sintética ou outro agente ligante, compactados a uma densidade entre 0,50 e 0,80 g/cm³ por prensagem a quente, num processo em que a totalidade da colagem entre as fibras é criada pelo adesivo adicionado” (Figura 2.3).

Figura 2.3. Painéis de MDF (*Medium Density Fiberboard*)

Uma característica favorável presente nos painéis MDF é a maior densidade nas faces, que é a região mais solicitada quando o painel trabalha sob o esforço de flexão estática. A menor quantidade de espaços vazios permite a pintura de maneira mais econômica e superfícies usinadas com menor rugosidade. O MDF possui consistência e algumas características mecânicas que se aproximam às da madeira maciça.

De uma forma geral os painéis MDF apresentam maior estabilidade dimensional que os painéis de partículas ou aglomerados (GRIGORIOU, 1983 e SUCHSLAND *et al.* 1978), o que é explicado pelo menor teor de umidade no equilíbrio com o ambiente, pela estrutura do painel e pelo baixo potencial de sorção (NIEMZ & POBLETE, 1996; JENSEN & KEHR, 1995 e XU & SUCHLAND, 1991).

Segundo uma classificação apresentada por Benaduce (1998), os painéis MDF, quando comparados com aglomerados, chapas duras e compensados, quanto às operações de corte, usinabilidade de borda e de superfície, curvagem (quando frios), torneamento, furação,

pintabilidade, revestimento plano e revestimento trabalhado, apresentaram desempenho inferior apenas em relação às chapas duras e, somente, nas operações de curvagem e pintabilidade.

As características finais de um painel MDF, sejam físicas, mecânicas, ambientais etc., são influenciadas por uma série de características relacionadas à matéria-prima, ao processo e aos produtos incorporados aos painéis (MALONEY, 1989).

O MDF é um produto homogêneo, uniforme, estável, de superfície plana e lisa que oferece boa trabalhabilidade, alta usinabilidade para encaixar, entalhar, cortar, parafusar, perfurar e moldurar, economia quanto à redução no uso de tintas, tingidores, laca e vernizes, economia no consumo de adesivo por metro quadrado, além de apresentar ótima aceitação para receber revestimentos com diversos acabamentos, conforme Yougquist (1998).

A homogeneidade proporcionada pela distribuição uniforme das fibras possibilita ao MDF acabamentos do tipo envernizado, pinturas em geral ou revestimento com papéis decorativos, lâminas de madeira ou PVC. Podem também ser executadas junções com vantagens em relação à madeira natural, já que não possuem nós, veios reversos e imperfeições.

É importante destacar o uso de espécies de reflorestamento, que surge como proposta interessante com novas espécies de madeira a serem empregadas pelas indústrias, pois estas têm conseguido apresentar resultados bastante satisfatórios, sem comprometer as propriedades físico-mecânicas dos painéis. Mas é de fundamental importância a necessidade de novas espécies de madeira para a produção de painéis, pois se estima que já na próxima década haja grande risco de ocorrer falta de florestas de *Pinus* no Brasil.

2.3.2 Tipos de MDF

As chapas de MDF são fabricadas com diferentes características, que variam em função de sua utilização final. Como exemplo cita-se, além das chapas “Standard” (com massa específica entre 650 a 750 kg/m³), as chapas FR (resistentes ao fogo), as chapas UR (resistentes à umidade, que são usadas em ambientes externos) e as de baixa densidade (com massa específica entre 400 e 600 kg/m³). Existem também chapas de maior resistência mecânica (HD, com massa específica acima de 900 kg/m³), fabricadas com maior quantidade de fibras e resinas, o que lhes permite aplicações que requeiram maior resistência à flexão ou ao impacto.

As espessuras das chapas variam de 3 mm até 60 mm, sendo as mais grossas utilizadas em elementos estruturais ou decorativos de arquitetura e móveis.

O MDF é oferecido ao mercado basicamente com três acabamentos: chapas cruas, chapas com revestimento laminado de baixa pressão e chapas com revestimento finish foil:

- As chapas cruas são fornecidas ao usuário in natura de forma que possa ser realizado o acabamento das peças através de pintura, revestimento com PVC;
- As chapas com revestimento com laminado de baixa pressão são produzidas através da sobreposição de uma folha de papel especial, impregnada com resina melamínica, que é fundida através de pressão e temperatura ao painel de MDF, resultando em uma chapa já acabada. Pode-se revestir apenas uma das faces, permitindo ao usuário usinar a face não revestida e acabá-la através de pintura ou revestimento PVC;

- As chapas com revestimento finish foil são produzidas por adição de uma película de papel colada à chapa, resultando em um produto já acabado. Essa película pode ser impressa com padrões madeirados ou em cores.

2.3.3 Usos e aplicações

O MDF destina-se principalmente a indústria moveleira. O uso do MDF é frequentemente como componente de móveis para partes que requerem usinagens especiais. Destaca-se a fabricação de pé de mesa, caixas de som, componentes frontais, internos e laterais de móveis, fundos de gaveta e tampos de mesa. É amplamente utilizado pelas indústrias de móveis e gabinetes, pois a solidez e a uniformidade garantem resultados satisfatórios no uso de técnicas convencionais, e também suas características de resistência mecânica permitem sua utilização até em painéis estruturais, segundo Castro (2000).

Na construção civil, pode ser utilizados como pisos finos, rodapés, almofadas de portas, divisórias, portas usinadas, batentes, balaústres e peças torneadas. A Figura 2.4 mostra a distribuição da aplicação doméstica do MDF.

Figura 2.4. Aplicação doméstica do MDF

Fonte: www.abipa.org.br (2008)

2.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE MDF

O processo de produção de MDF inclui principalmente: desfibramento mecânico da madeira (transformação dos cavacos em fibras), refino das fibras, secagem, mistura das fibras com resina, formação de colchão de um material resinado e prensagem a quente (Figura 2.5).

Figura 2.5. Etapas de Produção do MDF

Fonte: <http://www.duratex.com.br/> (2007)

A seguir são apresentadas as etapas principais da produção dos painéis de MDF, esquematizado na Figura 2.6.

- Descascamento: para obtenção de fibras, o tamanho da tora não influencia, podendo apresentar dimensões mais limitadas;
- Fragmentação: após o descascamento, as toras passam por uma operação de fragmentação, onde são gerados cavacos ou partículas, a partir de picadores;
- Classificação dos cavacos: a forma do cavaco é menos influente na qualidade final do produto, uma vez que os mesmos serão transformados em fibras. No processo produtivo, não é possível obter cavacos de tamanhos uniformes. Com esta irregularidade dimensional dos cavacos, os maiores são separados por baterias de peneiras e em seguida, retornam ao picador;
- Armazenamento de cavacos: são armazenados em silos com volume equivalente a 24 horas de operação. Como na maioria das vezes os cavacos ficam expostos à atmosfera, antes do processamento é feita uma seleção por peneiras, seguida de lavagem;
- Tratamento de cavacos: nesta etapa os cavacos são amolecidos para facilitar a operação do desfibrador na formação da polpa, reduzindo o consumo energético. A lignina presente nas camadas intercelulares é amolecida, perdendo sua capacidade de retenção de fibras, o que resulta numa polpa de fibras mais resistente e flexível, formando chapas mais rígidas;
- Desfibramento: as fibras podem ser obtidas por desfibradores mecânicos ou por meio de técnicas de aumento de pressão, que é um método menos utilizado;
- Mistura de resina: adicionada a resina, o catalizador e, em alguns casos, certos aditivos, e mistura-se à matéria-prima. As resinas mais utilizadas são à base de uréia-formaldeído, melanina-uréia-formaldeído e tanino-formaldeído;
- Secagem das fibras: o elevado teor de umidade das fibras acarreta uma série de problemas quando a manta formada é prensada a quente;

- Armazenamento das fibras: o silo de fibras, também chamado de tanque “pulmão”, tem a função de acumular um volume adequado de fibras para a formação das mantas (entrelaçamento), sem que ocorra uma provável interrupção em função de distúrbios na linha de fluxo das fibras;
- Entrelaçamento das fibras: o colchão seco formado a partir de uma suspensão das fibras ao ar. A altura do colchão é delimitada por um cilindro dentado acoplado a um tubo seccionador de fibra excedente;
- Seccionamento: o sistema de seccionamento muda conforme o tipo de linha de formação, que é o conjunto de equipamentos cujas operações dão a forma final ao MDF. Quando o processo de secagem é intermitente, a manta é cortada por lâminas circulares não-dentadas e, em seguida, encaminhada às operações de pré-prensagem a quente;
- Prensagem: a pré-prensagem evita possíveis demanchamentos e deslizamentos das fibras da manta durante a prensagem a quente. Para cada sistema de prensagem, existe um tipo de linha de formação;
- Resfriamento: é efetuado para evitar variações dimensionais da chapa após o aquecimento. Normalmente, são resfriadas à temperatura ambiente, protegidas das intempéries, onde o tempo depende do tipo de linha de formação utilizada;
- Corte, lixamento e revestimento: o corte é feito procurando estabelecer a medida dos painéis de MDF, conforme padrões estabelecidos. O lixamento está diretamente relacionado à preparação da superfície das chapas para acabamentos finais.

Figura 2.6. Processo de Produção do MDF

Fonte: CAMPOS e LAHR (2004).

2.5 GERAÇÃO DAS CINZAS DA QUEIMA DA CASCA DO *Pinus*

No processo de fabricação do MDF todas as partes da madeira são utilizadas, ou seja, as toras de *Pinus* são selecionadas para que as fibras sejam transformadas em cavacos, e a madeira descartada do descascamento é utilizada como combustível para a geração de energia para o processo de fabricação.

A geração de cinzas está relacionada à etapa de geração de energia para o processo de fabricação do MDF. Essa energia gerada é térmica e é utilizada principalmente em três etapas da fabricação do MDF:

- Para aquecimento da água e geração de vapor (caldeira) que é utilizado na desfibração da madeira;
- Para aquecimento do ar que é utilizado na secagem de fibras;

- Para aquecimento de óleo térmico que é utilizado para aquecer a prensa de MDF.

Porém a queima dessa matéria orgânica é incompleta, e essa queima incompleta da biomassa gera as cinzas, que ficam suspensas no ar, sendo captadas por multiciclones posicionados junto aos fornos de combustão e alta temperatura, como pode ser visto na Figura 2.7.

Figura 2.7. Multiciclones para Captação das Cinzas

No entanto, essas cinzas consistem em um problema ambiental, pois apresenta uma quantidade de alumínio muito acima da permitida, segundo a NBR 10004:2004, sendo classificada como resíduo classe II A– não inerte. A Figura 2.8 mostra o depósito desse resíduo na própria indústria, antes de ser descartado em aterros industriais ou outro destino final, como em reaproveitamento.

Figura 2.8. Depósito das Cinzas - Resíduo

O reaproveitamento das cinzas resultantes da queima da casca de *Pinus* pode trazer benefícios para o meio ambiente e para a indústria, pois a destinação das cinzas para aterros industriais é dispendiosa. As cinzas apresentam granulometria fina, podendo ser classificada como filer para a utilização em projetos de pavimentação, em substituição ao filer mineral.

A produção do resíduo dessa queima é de, aproximadamente, 2,57 kg de cinzas para a produção de 1m³ de chapas de MDF, com geração anual estimada em 4300 toneladas.

CAPÍTULO 3 – IMPORTÂNCIA DO FÍLER PARA AS MISTURAS ASFÁLTICAS

3.1 MISTURAS ASFÁLTICAS

Concreto betuminoso, denominado também mistura asfáltica, é uma mistura produzida a quente, em usina apropriada, com características específicas, sendo constituído de agregado mineral graduado, fíler e ligante betuminoso, lançado e comprimido a quente (DNER ES 313/97).

Segundo o Asphalt Institute (1995) o objetivo do projeto das misturas asfálticas para pavimentação é determinar, dentro dos limites das especificações de projeto, a um custo efetivo, a combinação e graduação de agregados minerais e cimento asfáltico que produza uma mistura que apresente as seguintes características:

- Asfalto suficiente para formar uma espessura adequada de películas de cimento asfáltico em torno do agregado, assegurando a durabilidade do pavimento;
- Estabilidade necessária para satisfazer as exigências do tráfego, sem distorção ou deslocamentos;
- Vazios suficientes na mistura compactada para permitir uma compactação adicional sob o carregamento do tráfego e uma leve expansão do asfalto em virtude do acréscimo de temperatura, sem, no entanto, apresentar exsudação, escoamento e perda de estabilidade;

- Um teor máximo de vazios que possa impedir a permeabilidade prejudicial do ar (envelhecimento) e da umidade (descolamento do asfalto da superfície do agregado) no interior da mistura;
- Trabalhabilidade suficiente para permitir um lançamento eficiente da mistura, sem sacrificar a sua estabilidade e desempenho;
- Superfície com textura e rugosidade que possam fornecer à capa resistência suficiente à derrapagem em condições climáticas desfavoráveis.

3.2 DEFINIÇÃO DE FÍLER

Por definição, material de enchimento – fíler – é um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 0,075 mm de abertura de malha quadrada (DNER – EM 367/97).

Santana (1995) define fíler de uma maneira mais geral: um material finamente dividido, constituído de partículas minerais provenientes dos agregados graúdos e/ou miúdos empregados na mistura asfáltica, ou de outras fontes como, por exemplo, pó calcário, cal hidratada, cimento Portland etc., que se incorpora à mistura asfáltica. Pode melhorar seu desempenho reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água, quando obedecidas as especificações próprias, onde devem estar incluídos os limites para granulometria e plasticidade.

O fíler é utilizado como material de enchimento dos vazios entre agregados graúdos e miúdos, contribuindo para fechamento da mistura, modificando a trabalhabilidade, a resistência à água e a resistência ao envelhecimento. Em decorrência do pequeno tamanho das partículas e de

suas características de superfície, o fíler age como material ativo, manifestado nas propriedades da interface fíler/ligante asfáltico, não sendo, portanto, apenas um material inerte, como é apresentado na definição geral do DNER EM 367/97.

Santana (1995) também discute dois pontos de vista da influência do tipo de fíler sobre o ligante asfáltico: mástique com fíler total (segundo Ruiz) e mástique com fíler ativo (segundo Puzinauskas). Segundo o ponto de vista de Ruiz, em um mástique bem dosado todas as partículas do fíler ficam em suspensão no asfalto, suas partículas não se tocando, formando um mástique homogêneo. Sob o ponto de vista de Puzinauskas, uma parte do fíler ainda se comporta como um agregado muito fino, suas partículas se tocando, formando um esqueleto mineral, e a outra parte fica em suspensão formando um mástique.

A porcentagem do material passante na peneira nº200 (0,075 mm de abertura) tem vários efeitos na densificação de uma mistura particular de agregados graúdos e miúdos, dependendo da granulometria apresentada pelas partículas abaixo desse diâmetro, da forma e da natureza das partículas. A graduação do material, portanto, tem efeito no amolecimento ou enrijecimento da mistura (MOTTA e LEITE, 2000).

Se a maior parte do agregado de enchimento que passa na peneira nº200 (75µm) é relativamente grosso, vai cumprir a função de encher os vazios do esqueleto mineral, decrescendo o índice de vazios e alterando o teor ótimo de ligante asfáltico. A AASHTO (1991) mostra, no entanto, que um fíler ultrafino, com porcentagem significativa de material menor que 20µm, e até com alguma porção menor que 5µm, pode atuar muito mais no próprio ligante, incorporando-se ao ligante asfáltico e compondo um filme de ligante, envolvendo as partículas de agregados.

Quando a porcentagem de material passante na peneira nº200 aumenta, reduzem-se os vazios do esqueleto mineral, melhora-se a graduação e a trabalhabilidade da mistura betuminosa aumenta até certo ponto. Acima de um dado nível, quanto maior a porcentagem passante na peneira nº200, os finos começam a prejudicar a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo os contatos entre as partículas grossas, alterando a capacidade de compactação (MOTTA e LEITE, 2000).

De modo a evitar os danos causados pelo excesso ou pela ausência de filer, McGennis *et al.* (1994), estipulou para as especificações SUPERPAVE de dosagem de misturas betuminosas a razão, em peso, entre o filer e ligante asfáltico, de 0,6 e 1,8 para todo tipo de mistura e estabelecendo valores de relação betume-vazios (RBV) em função do volume de tráfego, relativamente mais baixos do que os critérios tradicionais utilizados no Brasil.

Existe uma correlação entre a proporção de finos menores que 75 µm na mistura e o comportamento do revestimento no pavimento. Contudo, as propriedades físicas do filer que determinam o bom ou mau desempenho no campo devem ser melhor estudadas para o entendimento do mecanismo que governa a contribuição do fino no desempenho global da mistura.

3.3 INTERAÇÕES LIGANTE ASFÁLTICO-FÍLER

O uso de fileres é importante para diminuir a desuniformidade na consistência e na suscetibilidade térmica provenientes de eventuais irregularidades na produção de ligantes asfálticos e na confecção da massa asfáltica (SANTANA, 1995).

Para Santana (1995), o filler, além de preencher os vazios, apresenta a propriedade de aumentar a viscosidade – diminuindo a penetração – do ligante asfáltico. O filler ativa o asfalto, espessando-o e encorpendo-o, fazendo com que o mástique tenha maior viscosidade que o asfalto correspondente. Simultaneamente, tem-se o aumento do ponto de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica, aumento na resistência aos esforços de cisalhamento (estabilidade), no módulo de rigidez e na resistência à tração na flexão.

As propriedades físicas e químicas de cada filler têm efeito direto nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. A alteração que cada filler provoca ocorre por meio de mudanças nas propriedades químicas e físicas do ligante, que depende dos seguintes fatores (KAVUSSI e HICKS, 1997):

- Tipo de filler: graduação, forma dos grãos etc.;
- Natureza do filler: sua atividade físico-química, que afeta a afinidade com o ligante asfáltico;
- Concentração do filler na mistura.

Pinilla (1965) propôs uma técnica de determinação da concentração crítica de filler - C_s - a partir da qual o sistema filler/ligante asfáltico deixa de ser viscoso, transformando seu escoamento em não-newtoniano ou plástico. Para dosar misturas betuminosas que se deformam sem ruptura, ou seja, sem comprometer a vida de fadiga, a concentração em volume de filler deve ser igual ou menor que C_s . Quanto maior a concentração volumétrica do sistema filler-betume - C - mais próxima estarão as partículas dos agregados na mistura e menor será o volume de poros; conseqüentemente, mais rígida ficará. Santana (1995) recomenda que C seja de 10 a 20% menor do que C_s , definidas pelas expressões:

$$C = \frac{1}{\frac{\%b}{\%f} \times \frac{Df}{Db} + 1} \quad (3.1)$$

onde:

$\%b$: porcentagem de ligante asfáltico, em peso, na amostra total;

$\%f$: porcentagem de filer, em peso, na amostra total;

Df : densidade do filer;

Db : densidade do ligante asfáltico.

$$Cs = \frac{Vf}{Vf + Vb} \quad (3.2)$$

onde:

Vf : volume real de filer;

Vb : volume de ligante asfáltico nos poros.

Craus *et al.* (1978) considerou que entre os vários aspectos físico-químicos da interação filer/ligante asfáltico, a intensidade de adsorção (determinada pelo calor da interação) é o mais importante fator de caracterização do filer e de seus efeitos no comportamento das misturas betuminosas. A interação depende da composição química do cimento asfáltico e depende, principalmente, das características do filer, tais como composição mineralógica, textura superficial e superfície específica.

O índice de vazios de Rigden, modificado por Anderson, é um método para analisar o efeito do filer. É determinado sob condições padronizadas, em que os vazios resultam em uma máxima densificação do filer. Com isso é possível avaliar o teor de ligante asfáltico que irá

preencher os vazios e ainda avaliar o volume de ligante em relação ao teor determinado para a mistura (HARRIS e STUART, 1995)

Para Motta e Leite (2000), teoricamente, quando a quantidade de ligante aumenta além do índice de vazios Rigden, as partículas perdem o contato entre elas e a quantidade adicional de ligante promove uma lubrificação entre as partículas. Quando a quantidade livre de ligante asfáltico diminui, a rigidez da mistura aumenta. Quanto mais fino for o filer, menor deve ser a relação filer/ligante, pois o volume livre de ligante é que aumenta a espessura de recobrimento das partículas dos agregados. A razão ou porcentagem do volume de ligante livre, comparado com o volume total de ligante, tem um efeito significativo na rigidez do mástique.

Segundo Motta e Leite (2000), quanto menor o tamanho da partícula de filer, maior a incorporação do mineral no ligante, aumentando a rigidez da mistura. Mas, se por um lado, o enrijecimento melhora as propriedades relativas à resistência à deformação permanente, pode também piorar a resistência à fadiga.

Craus *et al.* (1978), seguindo a linha defendida por Puzinauskas, também considera que o filer tem dois caminhos de atuação nas misturas asfálticas densas:

- As partículas maiores do filer são parte do agregado mineral e preencherão os vazios e interstícios dos agregados graúdos, promovendo o contato pontual entre as partículas maiores e dando maior resistência às misturas;
- As partículas menores do filer se misturam com ligante asfáltico, aumentando sua consistência, cimentando as partículas maiores, no que alguns autores chamam de mástique.

A gradação do filer afeta a trabalhabilidade, da mesma forma que a gradação do esqueleto mineral, sendo proporcional à relação entre a parte mais graúda e mais miúda do filer (menor que 20 μm). Quanto mais pó estiver contido no filer, maior seu efeito na trabalhabilidade e no desempenho da mistura total. Isto é atualmente muito importante, pois segundo a AASHTO (1991) é cada vez maior a tendência de se usar como filer os finos da coleta de filtros instalados nas usinas.

No comportamento das misturas asfálticas o índice de vazios assume particular importância. A influência da porcentagem de vazios quanto à fadiga pode ser explicada pelos seus efeitos na rigidez e nas tensões de tração que se desenvolvem no ligante ou na combinação filer/ligante, perdendo características de flexibilidade e provocando, assim, um aumento na resistência à fadiga do material (ROBERT *et al.*, 1996).

Soares e Cavalcante (2001) estudaram seis tipos de fileres: areia de campo, pó de pedra, pó calcário, cal hidratada, carbonato de magnésio e cimento Portland. Concluiu que, com o aumento do teor de filer nas misturas asfálticas, os valores de resistência à tração também aumentaram e, em relação ao teor de ligante de projeto, percebeu que só existe mudança quando se altera o teor de filer, sendo que, quanto maior o teor de filer, menor o teor de ligante de projeto, ou seja, com diferentes fileres utilizados pode ser considerado o mesmo teor de projeto de ligante.

Souza *et al.* (1998) utilizaram resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como filer em misturas asfálticas e comparou com misturas com cal e cimento Portland. Percebeu que as misturas que tem como filer a cal apresentaram valores maiores de estabilidade enquanto as

misturas com cimento Portland apresentaram o menor. O teor de asfalto de projeto foi maior para a cal (6%), depois com o resíduo (5,5%) e o mais baixo para o cimento Portland (5%).

Motta e Leite (2000) estudaram o efeito de três tipos de fileres: calcário, cimento Portland e pó de pedra. Dos fileres estudados, o calcário apresentou o menor tamanho de partícula e o cimento Portland teve o tamanho intermediário. Foi observado que os corpos-de-prova preparados com filer calcário apresentaram módulos e valores de resistência à tração superiores aos obtidos com os demais fileres, que apresentam granulometria mais grossa. Os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram o efeito da granulometria do filer na rigidez da mistura betuminosa, pois quanto menor o tamanho de partícula do filer, maior a incorporação do mineral no ligante, aumentando a rigidez da mistura.

Farias (2005) estudou a influência da utilização de filer proveniente da britagem de concreções lateríticas e da cal e concluiu que a origem da laterita e o tipo de filer utilizado influenciaram decisivamente nas propriedades mecânicas das misturas. As amostras com filer laterítico apresentaram comportamento superior por aquelas com o filer cal, em relação à resistência à tração, a relação módulo de resiliência e resistência à tração (MR/RT) e resistência à fadiga; embora o tipo de filer não tenha influenciado a resistência à deformação permanente. O único ensaio para o qual o filer cal resultou em melhor comportamento da mistura foi o ensaio de desgaste Cántabro.

CAPÍTULO 4 – MÉTODO BAILEY DE SELEÇÃO GRANULOMÉTRICA PARA MISTURAS ASFÁLTICAS

O método Bailey de seleção granulométrica de agregados foi desenvolvido por Robert Bailey, do Departamento de Transportes de Illinois (IDOT), e vem sendo utilizado desde a década de 80. Vavrik (2000) e Vavrik *et al.* (2002a, 2002b e 2001) têm refinado esse método para que se torne aplicável a qualquer mistura, independentemente do tamanho máximo do agregado.

O método Bailey relaciona-se diretamente com as características de compactação de cada fração da composição pétreas – agregado graúdo, miúdo e fino, com os vazios no agregado mineral (VAM) e com os vazios da mistura (Vv). Ele seleciona a estrutura de agregado da mistura buscando maior intertravamento dos agregados graúdos, podendo ser utilizado com qualquer método de dosagem de misturas asfálticas, como por exemplo, Superpave, Marshall e Hveem.

O método Bailey define agregado graúdo e fino permitindo ajustes na quantidade de vazios na mistura em função da porcentagem de cada material. A combinação dos agregados considera a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas como sendo dependente, principalmente, do intertravamento dos agregados graúdos, que é um parâmetro obtido através de ensaios de massa específica solta e compactada.

Segundo Vavrik *et al.* (2002a), através da distribuição granulométrica dos agregados e suas respectivas massas específicas e massa específicas solta e compactada – que fornece as

características de compactação de cada fração do agregado em uma mistura, o método Bailey faz a seleção da distribuição granulométrica ideal, assegurando a resistência à deformação permanente pelo intertravamento dos agregados graúdos e a resistência ao desgaste pelo maior teor de ligante, devido ao adequado volume de vazios.

Tradicionalmente, agregado graúdo é todo material retido na peneira 4,75 mm (ASTM – C294, 1989), 2,38 mm (Instituto do Asfalto) ou a de 2,00 mm para a divisão entre agregado graúdo e fino. Consequentemente é considerado material fino todo material que passa nessa mesma peneira.

No método Bailey, a definição de agregado graúdo e fino é mais específica, de modo a determinar a compactação e o intertravamento do agregado através da combinação de agregados de vários tamanhos. De acordo com a definição do método Bailey, são considerados agregados graúdos as partículas que, mesmo acondicionadas em certo volume, criam vazios; e todas as partículas que preenchem os vazios deixados pelo agregado graúdo são consideradas finas.

Com essa definição, é necessário mais do que uma peneira de controle para a divisão entre agregado graúdo e fino, e essas peneiras vão depender do diâmetro máximo nominal da mistura. Diâmetro máximo nominal é definido, segundo as especificações Superpave, como a primeira peneira acima da peneira que retém mais que 10% de material.

No método Bailey a peneira que define a divisão entre agregado graúdo e fino é chamada de Peneira de Controle Primário (PCP), sendo baseada no diâmetro máximo nominal (DMN) da mistura. A PCP é considerada como sendo a peneira com o diâmetro de abertura mais

próximo do resultado da Equação 4.1.

$$PCP = DMN \times 0,22 \quad (4.1)$$

onde:

PCP = Peneira de Controle Primário;

DMN = Diâmetro Máximo Nominal.

Na composição da mistura é possível determinar a quantidade de vazios deixados pelos agregados graúdos e preenchê-los com a quantidade apropriada de agregado fino, e com essa finalidade para cada agregado graúdo da mistura deve ser determinada a sua massa específica solta e compactada e, para cada agregado fino, apenas a massa específica compactada. Esses dados volumétricos representam como os agregados se arranjam estruturalmente, formando vazios, sendo necessários para a avaliação das propriedades de intertravamento dos agregados.

As misturas feitas pelo método Bailey apresentam valores maiores de vazios do agregado mineral (VAM) e de relação betume-vazios (RBV) do que os das misturas convencionais, o que é um indicativo de misturas menos propensas às deformações permanentes e potencialmente mais resistentes às trincas por fadiga; também apresentam melhores resultados nos ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração (CUNHA, 2004).

4.1 PRINCÍPIOS DO MÉTODO BAILEY

O método Bailey procura avaliar as características de compactação dos agregados em toda a mistura. Misturas de graduação fina são definidas, geralmente, como uma combinação de agregados de diversos tamanhos que apresentam uma curva granulométrica abaixo da linha de máxima densidade no gráfico de potência 0,45.

De acordo com o método Bailey, a principal diferença entre uma mistura de graduação fina e graúda é a porção estrutural de agregado que suporta as cargas e controle os vazios do agregado mineral (VAM); misturas de graduação fina contêm um determinado volume de agregado fino que excede o volume de vazios encontrado na massa específica solta do agregado.

Numa mistura de graduação graúda, o agregado graúdo tem um papel significativo na compactação do agregado fino. Entretanto, numa mistura de graduação fina, as partículas de agregado graúdo ficam dispersas numa estrutura de agregado fino. A partir do ponto em que as partículas de agregado graúdo não estão em contato entre elas mesmas, os vazios do agregado mineral (VAM) são controlados principalmente pelo agregado fino.

Para determinar a seleção granulométrica para uma mistura asfáltica de graduação fina através do método Bailey são necessários dois processos:

1. Utilização da massa específica escolhida do agregado graúdo, a qual é menor do que a massa específica solta. Os agregados graúdos, ou seja, partículas com diâmetro acima da

Peneira de Controle Primário (PCP), não formam um esqueleto, pois não estão em contato e sim dispersos em uma matriz de agregado fino;

2. Avaliação da graduação da misturas selecionada abaixo da PCP como uma mistura a parte, ou seja, essa porção é avaliada como uma nova mistura de agregados graúdos e finos, mas com DMN da mistura original.

4.2 SELEÇÃO GRANULOMÉTRICA

As informações necessárias para a seleção granulométrica são as tipicamente usadas para misturas asfálticas densas e algumas adicionais, como as massas específicas dos agregados graúdos e finos.

Para o método Bailey, então, são determinadas:

- Massa específica de cada agregado;
- Massa específica solta dos agregados graúdos;
- Massa específica compactada dos agregados graúdos e finos;
- Massa específica escolhida para os agregados graúdos;
- Quantidade desejada dos agregados graúdos e finos;
- Quantidade desejada de material passante na peneira 0,075 mm (nº 200);
- Materiais de preenchimento (filer) que serão usados.

4.3 ANÁLISE DA MISTURA

Para a avaliação da compactação de cada uma das três porções de graduação selecionada, o método Bailey define os três parâmetros:

1. Proporção de agregados graúdos (Proporção AG): indica o comportamento da mistura quanto à compactação das partículas de agregados graúdos e como a porção fina da mistura preenche os vazios deixados pelo agregado graúdo. Para o cálculo da proporção de agregados graúdos é utilizada a Equação 4.2.

$$\text{Proporção AG} = \frac{(\% \text{passante na PM} - \% \text{passante na PCP})}{(100\% - \% \text{passante na PM})} \quad (4.2)$$

onde:

PM: Peneira Média, definida como sendo a peneira de abertura mais próxima da metade do diâmetro máximo nominal da mistura.

2. Proporção graúda dos agregados finos (Proporção GAF): indica o comportamento da mistura quanto à compactação da porção graúda do agregado fino e como a porção fina do agregado fino preenche os vazios deixados pela porção graúda do agregado fino. A proporção graúda dos agregados finos é determinada através da Equação 4.3.

$$\text{Proporção GAF} = \frac{(\% \text{passante na PCS})}{(\% \text{passante na PCP})} \quad (4.3)$$

onde:

PCS: Peneira de Controle Secundário, definida como a peneira de abertura mais próxima da

multiplicação da PCP pelo fator 0,22.

3. Proporção fina dos agregados finos (Proporção FAF): indica o comportamento da mistura quanto à compactação da porção fina do agregado fino e o preenchimento dos vazios que restaram na porção fina de agregados da mistura. O cálculo da proporção fina dos agregados finos é realizado através da Equação 4.4.

$$\text{Proporção FAF} = \frac{(\% \text{ passante na PCT})}{(\% \text{ passante na PCS})} \quad (4.4)$$

onde:

PCT: Peneira de Controle Terciário, definida como a peneira de abertura mais próxima da multiplicação da PCS pelo fator 0,22

CAPÍTULO 5 – ESPECIFICAÇÕES SUPERPAVE

O Método Superpave é resultado das pesquisas feitas pelo programa SHRP (Strategic Highway Reserch Program) entre 1987 e 1993 sobre os materiais utilizados em pavimentos asfálticos. O SHRP, coordenado pelos Estados Unidos, contou com a participação de 22 países, inclusive o Brasil, e teve um orçamento inicial de 150 milhões de dólares (SHRP, 1993).

Foram desenvolvidos métodos de análise de materiais betuminosos e misturas asfálticas baseados em propriedades fundamentais, diretamente relacionadas com o desempenho dos pavimentos em serviço. As misturas Superpave são dosadas volumetricamente, sendo controladas por propriedades dos agregados e pelo equilíbrio dos volumes de vazios, de asfalto e de agregados (HUBER *et al.*, 1998).

O método Superpave consiste em um método de dosagem de misturas asfálticas, com especificações e ensaios para ligantes e misturas asfálticas, o que inclui procedimentos para avaliação e desenvolvimento de modificadores, como polímeros ou borracha de pneu, propondo ainda um sistema para controle de qualidade da construção.

O programa SHRP visou, principalmente, a avaliação de ligantes asfálticos, projeto de misturas e sua análise. Não foram feitas, a princípio, pesquisas específicas para os agregados, pois a idéia era analisá-los através da análise das misturas. Mais tarde, os pesquisadores perceberam que era necessário avaliar os agregados separadamente dos outros componentes da misturas e, para isso, um grupo de especialistas fez uma abordagem consensual,

estabelecendo recomendações para as propriedades necessárias aos agregados em função dos vários níveis de tráfego.

5.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS

Os pesquisadores do SHRP concluíram que os agregados possuem fundamental importância nas propriedades do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Embora não tenham desenvolvido nenhum novo procedimento para a avaliação dos agregados, procedimentos já existentes foram refinados de modo a se adequarem ao sistema Superpave. São especificados dois tipos de propriedades de agregados no sistema Superpave, as propriedades de origem e de consenso (MOTTA *et al.*, 1996).

As propriedades de origem são aquelas que as agências usam regularmente para testar a qualidade das fontes dos agregados. O SHRP não especifica valores limites, pois são muito dependentes da fonte, mas recomenda que os organismos locais os definam para cada projeto específico:

- Dureza (AASHTO T 96): definida como o percentual, em peso, de material perdido durante o ensaio de Abrasão Los Angeles com agregados maiores que 2,36 mm. O ensaio indica a resistência à abrasão que os agregados devem possuir durante a usinagem, compactação e serviço;
- Sanidade (AASHTO T 104): estima a resistência ao interperismo, é definida como o percentual, em peso, de material perdido durante tratamento com solução de sulfato de sódio ou de magnésio, sendo realizado para agregados miúdos e graúdos;

- Materiais Deletérios (AASHTO T 112): é definido pelo percentual, em peso, de contaminantes nos agregados, podendo ser realizado em agregados miúdos e graúdos.

As propriedades de consenso são aquelas consideradas críticas para o desempenho adequado de um CBUQ. São ditas de “consenso”, pois foi resultado de um amplo entendimento de diversos especialistas americanos, através da comparação entre os valores das especificações em uso. Os valores das propriedades de consenso variam de acordo com o nível de tráfego e a posição relativa da camada na estrutura do pavimento. Essas propriedades são:

- Angularidade do agregado graúdo (ASTM D 6821): definida como o percentual, em peso, de agregado graúdo retido na peneira de abertura 4,75 mm, que possua uma ou mais faces fraturadas. Agregados de forma cúbica e com faces fraturadas apresentam uma maior resistência ao cisalhamento;
- Angularidade do agregado miúdo (ASTM D 6821): definida como o percentual de vazios não compactados contidos entre as partículas dos agregados, quando são derramadas de uma altura pré-estabelecida. Quanto maior o teor de vazios, maior a quantidade de faces fraturadas no agregado;
- Partículas planas e alongadas (ASTM D 4791): definida como o percentual, em peso, de agregado graúdo com relação entre a maior e a menor dimensão maior que 5. Lamelaridade alta indica a grande presença de partículas planas e alongadas, o que aumenta a tendência de quebra de agregados durante a compactação e vida em serviço do pavimento;

- Teor de finos (AASHTO T 176): é definido como o porcentual, em peso, de material silte mais argila, passante na peneira de abertura 0,075 mm, presente no agregado. Um grande teor de argila impregnado nos agregados dificulta a adesão do ligante ao agregado e deixa a mistura mais suscetível à ação da água.

A Tabela 5.1 reproduz os valores especificados na AASHTO MP 2-01 para as propriedades de consenso.

Tabela 5.1 - Especificações Superpave: requisitos das propriedades de consenso

Número N ^a (10 ⁶)	Fases fraturas		Vazios não compactados		Equivalente Areia (%) mínima	Partículas Planas e Alongadas (%) máxima
	Agregado graúdo		Agregado fino			
	(%) mínima		(%) mínima			
	≤ 100 mm*	> 100 mm*	≤ 100 mm*	> 100 mm*		
< 0,3	55/-	-/-	-	-	40	-
0,3 a < 3	75/-	50/-	40	40	45	10
3 a < 10	85/80 ^b	60/-	45	40	45	
10 a < 30	95/90	80/75	45	40	45	
≥ 30	100/100	100/100	45	45	50	

a) Tráfego de projeto esperado na faixa de projeto para um período de 20 anos

b) 80/85 indica que 85% do agregado graúdo têm uma face fraturada e 80% tem duas ou mais faces fraturadas

*Profundidade da camada em relação à superfície do pavimento

Fonte: AASHTO MP 2-01

5.2 GRANULOMETRIA

Para especificar a granulometria do agregado, o Superpave utiliza um gráfico onde no eixo das abscissas estão as aberturas das peneiras, em milímetro, elevadas à potência de 0,45, e a ordenada é a porcentagem passante de agregado. Apresenta-se nesse gráfico a linha de densidade máxima, que corresponde à reta que parte da origem e vai até o ponto do tamanho máximo do agregado.

Para que a graduação dos agregados atenda aos critérios Superpave, a curva granulométrica deve passar entre os pontos de controle e fora da zona de restrição, como indicado no exemplo da Figura 5.1, para diâmetro nominal máximo de 19,0 mm.

Os pontos de controle funcionam como limites dentro dos quais a curva granulométrica deve passar para satisfazer os requisitos do Superpave; esses pontos são fixados nas peneiras de tamanho máximo, nominal máximo, uma peneira abaixo do tamanho nominal máximo e nas peneiras de 2,36 mm e 0,075 mm.

A zona de restrição fica sobre a linha de densidade máxima, entre as peneiras intermediárias (4,75 ou 2,36 mm) e 0,30 mm. Essa zona define uma região por onde a curva granulométrica não deve passar, porém essa restrição serve apenas como recomendação para se evitar misturas com alta proporção de areia fina natural em relação ao total de agregados finos, que geralmente apresentam baixo volume de vazios do agregado mineral (VAM).

Os valores especificados estão reproduzidos na Tabela 5.2 e 5.3, com as várias faixas possíveis de enquadramento dos agregados (AASHTO MP 2-01), sendo que o Diâmetro Máximo Nominal é definido como sendo a peneira com um tamanho maior do que o primeiro tamanho de peneira que retém mais que 10% de material.

Tabela 5.2 - Pontos de controle conforme o Diâmetro Máximo Nominal

Abertura	37,5 mm		25,0 mm		19,0 mm		12,5 mm		9,5 mm	
mm	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
50,0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37,5	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-
25,0	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-
19,0	-	-	-	90	90	100	100	-	-	-
12,5	-	-	-	-	-	90	90	100	100	-
9,5	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100
4,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90
2,36	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67
0,075	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10

Fonte: AASHTO MP 2-01

Tabela 5.3 - Zona de restrição de acordo com o Diâmetro Máximo Nominal

Abertura	37,5 mm		25,0 mm		19,0 mm		12,5 mm		9,5 mm	
mm	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
4,75	34,7	34,7	39,5	39,5	-	-	-	-	-	-
2,36	23,3	27,3	26,8	30,8	34,6	34,6	39,1	39,1	47,2	47,2
1,18	15,5	21,5	18,1	24,1	22,3	28,3	25,6	31,6	31,6	37,6
0,60	11,7	15,7	13,6	17,6	16,7	20,7	19,1	23,1	23,5	27,5
0,075	10	10	11,4	13,7	13,7	13,7	15,5	15,5	18,7	18,7

Fonte: AASHTO MP 2-01

Figura 5.1. Especificação Superpave: zona de restrição e pontos de controle

5.3 REQUISITOS VOLUMÉTRICOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS

O método Superpave avalia algumas características individuais dos agregados (propriedades de consenso e de origem) e algumas propriedades volumétricas (Vazios do Agregado Mineral – VAM, e Relação Betume Vazios – RBV) das misturas asfálticas prontas.

A porcentagem de vazios do agregado mineral (VAM) e a porcentagem de ligante asfáltico interferem diretamente no volume de vazios de uma mistura asfáltica. O volume de vazios é um fator muito importante para o dimensionamento de misturas asfálticas (CROSS & BROWN, 1992), pois misturas asfálticas com volume de vazios menor que 2,5% são propensas à deformação permanente, independentemente das outras propriedades da mistura. O Superpave recomenda um volume de vazios de 4% para o projeto de misturas, enquanto no Brasil adota-se, geralmente, volume de vazios entre 4 e 6% para camadas de ligação (*binder*) e entre 3 e 5% para revestimento (NBR 12891/93).

A porcentagem de vazios do agregado mineral (VAM) depende da distribuição granulométrica, da quantidade de filer mineral ou material passante na peneira 0,075 mm, do grau de compactação, da forma, da textura e da angularidade dos agregados (COMINSKKY *et al.*, 1998).

Para misturas asfálticas após a compactação pelo tráfego, o método Superpave propõe 4% de volume de vazios (V_v) e relação betume vazios (RBV), que são os vazios do agregado mineral (VAM) preenchido com ligante asfáltico, entre 75 e 80%. O Superpave estabelece valores mínimos para o VAM de acordo com o diâmetro máximo nominal da mistura, como mostra a Tabela 5.4. Misturas de graduação densa, com o VAM abaixo dos valores

especificados, podem apresentar problemas de durabilidade, pois podem não conter vazios suficientes para a adição do ligante asfáltico.

Tabela 5.4 - Requisitos de VAM da especificação Superpave

Diâmetro Máximo Nominal (DMN) da mistura (mm)	VAM mínimo (%)
9,5	15
12,5	14
19,0	13
25,0	12
37,5	11

(COMINSKY *et al.*, 1998)

O método Superpave propõe como critério de projeto uma determinada quantidade de filer mineral para misturas asfálticas, expressa em porcentagem do peso total da mistura, calculado como sendo a razão entre a porcentagem em peso do agregado passante na peneira 0,075 mm e o teor efetivo de asfalto. O teor efetivo de asfalto é a quantidade de asfalto usado na mistura descontando-se o asfalto que é absorvido pelo agregado. É recomendado que a proporção de filer mineral fique entre 0,6 e 1,8 para qualquer tipo de mistura (MOTTA *et al.*, 1996).

Em misturas de graduação grossa, que passam abaixo da zona de restrição, KANDHAL *et al.* (1998) mostram que o VAM mínimo recomendado é inadequado, penalizando as misturas que apresentam baixos valores de VAM. Misturas de graduação grossa, usadas em rodovias com alto volume de tráfego, e o aumento do esforço de compactação pelo uso do compactador giratório podem resultar em menores valores de VAM, sem comprometer o desempenho.

Segundo Kandhal *et al.* (1998), o mesmo VAM desenvolvido para misturas densas dosadas pelo método Marshall é o mínimo requisitado pelo Superpave. A especificação de VAM

mínimo visa garantir a durabilidade da mistura, através de uma quantidade mínima de asfalto na mesma. Porém, a durabilidade de misturas asfálticas está estreitamente ligada à espessura da película de ligante asfáltico que recobre o agregado. Sendo assim, o VAM mínimo deveria ser baseado na espessura de película de asfalto que recobre os agregados, pois a espessura varia de acordo com a graduação da mistura.

Kandhal *et al.* (1998) propõem também, um ajuste na especificação Superpave para o VAM, principalmente para graduações graúdas. Tal ajuste se dá por meio de um fator de graduação, que deve subtrair os limites Superpave para o VAM. A Tabela 5.5 mostra os fatores de graduação para correção do VAM, em função do diâmetro máximo nominal da mistura, visando a obtenção de uma espessura de recobrimento de 8 μm .

Tabela 5.5 - Fatores de graduação para correção do VAM

Diâmetro Máximo nominal (mm)				
37,5	25	19	12,5	9,5
0,5	1,0	1,5	1,5	2,0

(KANDHAL *et al.*, 1998)

A relação betume-vazios (RBV), ou os vazios preenchidos com ligante asfáltico, é outro requisito volumétrico de misturas Superpave. O RBV afeta a durabilidade e a flexibilidade do pavimento asfáltico e, portanto, as misturas asfálticas devem se enquadrar numa faixa de RBV para garantir a quantidade suficiente de ligante asfáltico que assegure uma adequada película de asfalto recobrindo as partículas de agregado, de forma a evitar o envelhecimento e endurecimento, mas sem excesso, pois muito ligante asfáltico também é prejudicial à mistura, além de aumentar o custo.

Geralmente, o valor ótimo de RBV é atingido quando a mistura se enquadra nos valores de VAM especificados em função do diâmetro máximo nominal e possui 4% de vazios. Misturas com RBV menor que 65% podem levar ao endurecimento prematuro ou excessivo de misturas asfálticas projetadas para rodovias com volume de tráfego médio a alto, causando trincas por fadiga e desgaste do revestimento asfáltico. Já misturas com RBV maior que 85% são propensas à exsudação, corrugação e deformação permanente. Diante disso, Cominsky *et al.* (1998) indicam 75% de RBV como ideal.

No Brasil, o RBV indicado para revestimentos fica entre 75 e 82% e, para camadas de ligação (binder), entre 65 e 72% (NBR 12891/93). A Tabela 5.6 mostra os valores de RBV para misturas Superpave projetadas com 4% de volume de vazios, em função do volume de tráfego.

Tabela 5.6 - Requisitos Superpave para RBV

Tráfego (ESALs)	RBV de projeto (%)
$< 3 \times 10^5$	70 - 80
$> 3 \times 10^5$	65 - 78
$< 1 \times 10^8$	65 - 75
$< 1 \times 10^8$	65 - 75

(COMINSKY *et al.*, 1998)

CAPÍTULO 6 – MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 MATERIAIS UTILIZADOS

6.1.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa é o CAP 50/70, proveniente da refinaria REPAV.

Os resultados dos ensaios de caracterização do ligante foram fornecidos pelo próprio laboratório e estão apresentados na Tabela 6.1

Tabela 6.1 - Caracterização do Ligante Asfáltico CAP 50/70

Características	Resultado	Especificação
Penetração	6,2 mm	5,0 a 7,0
Ponto de Amolecimento	47,5 °C	46 mín.
Viscosidade Brookfield - 135°C	336 cP	274 mín.
Viscosidade Brookfield - 150°C	168 cP	112 mín.
Viscosidade Brookfield - 177°C	62 cP	57 a 285
RTFOT Penetração Retida	56%	55 mín.
RTFOT Aumento do Ponto de Amolecimento	4,3 °C	8 máx.
RTFOT Ductilidade a 25°C	>150 cm	20 mín.
RTFOT Variação em Massa	0,270 %	0,5 máx.
Solubilidade no Tricloroetileno	100% em massa	99,5 mín.
Ductilidade a 25°C	>150 cm	60 mín.
Ponto de Fulgor	298 °C	235 mín.
Índice de Suscetibilidade Térmica	-1,3	-1,5 a 0,7
Densidade	1,013	-

6.1.2 Agregado

Nesta pesquisa utilizou-se agregado basáltico, muito utilizado em obras de pavimentação asfáltica no interior do estado de São Paulo, proveniente da pedreira Bandeirante, localizada na cidade de São Carlos/SP.

A granulometria do agregado utilizado foi determinada utilizando-se as peneiras recomendadas pelo método Superpave, com abertura de malhas de 0,075 mm; 0,15 mm; 0,30 mm; 0,60 mm; 1,18 mm; 2,36 mm; 4,75 mm; 9,5 mm; 12,5 mm; 19,0 mm e 25,0 mm.

O peneiramento dos agregados foi realizado totalmente de maneira manual, para que o erro fosse minimizado e, portanto, possam ser produzidos corpos-de-prova com características mais semelhantes possível. Os dados de granulometria estão apresentados na Tabela 6.2 e nas Figuras 6.1 e 6.2.

Tabela 6.2 - Granulometria dos Agregados			
Abertura Peneira (mm)	Pedra 1	Pedrisco	Pó
Porcentagem passada acumulada			
25	100,00	100,00	100,00
19	84,89	100,00	100,00
12,5	9,47	100,00	100,00
9,5	0,85	100,00	100,00
4,75	0,00	28,15	100,00
2,36	0,00	0,00	68,49
1,18	0,00	0,00	44,81
0,6	0,00	0,00	32,09
0,3	0,00	0,00	24,65
0,15	0,00	0,00	16,41
0,075	0,00	0,00	10,76

Figura 6.1. Granulometria dos Agregados – Especificação Superpave

Figura 6.2. Granulometria dos Agregados

6.1.3 Cinzas – Resíduo

As cinzas utilizadas são resultantes da queima da casca de *Pinus* em algumas etapas da fabricação de MDF (Medium Density Fiberboard) e apresentam granulometria fina, sendo classificada como filer.

O resíduo é proveniente da empresa Duratex – unidade Agudos/SP, divisão de madeiras. Foram recolhidas do depósito dentro do pátio da fábrica e acondicionadas em sacos plásticos para transporte até o Laboratório de Estradas da Escola de Engenharia de São Carlos-USP.

O material foi utilizado após secagem em estufa, até constância de massa, para a realização dos ensaios de caracterização e das misturas asfálticas. A Figura 6.3 mostra as cinzas utilizadas na pesquisa.

Figura 6.3. Cinzas Resultantes da Queima da Casca de *Pinus*

6.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

6.2.1 Determinação da massa específica solta do agregado graúdo

A massa específica solta de um agregado representa a massa, relativa a um determinado volume, necessária para preencher um dado recipiente, sem qualquer tipo de esforço de compactação. Representa uma situação de mínimo contato entre partículas e varia de acordo com o diâmetro máximo nominal da mistura.

É preciso determinar a massa específica solta para cada agregado gráudo constituinte da mistura, pedra 1 e pedrisco, usando a norma AASHTO T-19/T 19M (1997). Inicialmente mede-se a massa de um cilindro de capacidade indicada na Tabela 6.3 e mostrado na Figura 6.4 (M_{cv}), o qual deve ter altura aproximadamente igual ao diâmetro, e a altura nunca deve ser menor que 80% ou 150% maior que o diâmetro. Em seguida, com uma pá colocam-se os agregados no recipiente, em camadas, tomando-se o cuidado para que não exista a compactação. O excesso de material é retirado manualmente até que a superfície livre dos agregados esteja relativamente plana e no limite superior do cilindro. Verifica-se a massa do conjunto, determinando a massa específica solta da pedra 1 e do pedrisco através da Equação 6.1:

$$MES = \frac{M_{cg} - M_{cv}}{V_c} \quad (6.1)$$

onde:

MES : massa específica solta do agregado gráudo (kg/m^3);

M_{cg} : massa do cilindro com agregado gráudo (kg);

M_{cv} : massa do cilindro vazio (kg);

V_c : volume do cilindro (m^3).

Tabela 6.3 - Capacidade do Recipiente para Determinação da Massa Específica Solta

DMN (mm)	Capacidade do Cilindro (l)
12,5	2,8
25	9,3
37,5	14
75	28
112	70

Figura 6.4. Cilindro Utilizado no Ensaio de Determinação da Massa Específica Solta

6.2.2 Determinação da massa específica compactada do agregado fino

Em misturas densas, os vazios criados pelo agregado graúdo, função da massa específica escolhida, são preenchidos por um volume de agregado fino, determinado através da massa específica compactada. A massa específica compactada é usada para garantir que a estrutura de agregado fino seja a mais forte possível.

É preciso determinar a massa específica compactada para cada agregado fino constituinte da mistura, seguindo o indicado na AASHTO T-19 19M (1997). Neste ensaio utiliza-se um cilindro de capacidade citada na Tabela 6.3 e mostrado na Figura 6.5, com material sendo disposto em três camadas, cada uma delas recebendo 25 golpes de uma haste metálica caindo de uma altura de 5 cm da superfície livre do agregado. O excesso de material deve ser rasado com o auxílio de uma régua metálica, com o cuidado de não causar nenhuma compactação adicional, até atingir a borda superior do cilindro. A massa específica compactada é determinada através da Equação 6.2:

$$MEC = \frac{M_{cf} - M_{cv}}{V_c} \quad (6.2)$$

onde:

MEC: massa específica compactada do agregado fino (kg/m³);

Mcf: massa do cilindro com agregado fino (kg);

Mcv: massa do cilindro vazio (kg);

Vc: volume do cilindro (m³).

Figura 6.5. Cilindro Utilizado no Ensaio de Determinação da Massa Específica Compactada

6.2.3 Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo

A ASTM C 127 padroniza o método para a determinação da densidade aparente do agregado graúdo, assim como a porcentagem de água absorvida pelo agregado. O ensaio consiste, inicialmente, na preparação da amostra de agregado graúdo, composta por frações de materiais retidos na peneira de abertura de 4,75 mm, lavados para a remoção do pó ou outros

contaminantes da superfície da partícula e secos em estufa. A quantidade de material de cada amostra é determinada pela norma ASTM C 127, de acordo com o diâmetro nominal máximo do agregado, conforme a Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Quantidade do Material da Amostra para Determinação da Densidade do Agregado Graúdo

DMN (mm)	Quantidade de material (kg)
12,5	2,0
25	3,0
37,5	4,0
75	5,0
112	8,0

Depois, a amostra é submersa em água destilada por um período de aproximadamente 24 horas, sendo, após esse período, removida da água e colocada sobre uma toalha, para posterior secagem superficial.

O procedimento de secagem consiste no espalhamento das partículas sobre uma toalha (Figura 6.6) e, em seguida na rolagem destas, de tal forma que as faces toquem a toalha até que o filme de água que envolve cada partícula não seja mais visível, atingindo assim a condição de secura superficial. A condição de secura superficial é atingida quando a partícula torna-se fosca, sem o brilho da luz que é refletido pela água, ou, ainda, se for observada uma mudança de cor da partícula.

Ao secar a amostra deve-se tomar cuidado para evitar a retirada da água contida dentro dos poros do agregado. Para tanto, deve-se manter a toalha úmida durante o ensaio para que a secagem da partícula seja apenas superficial, pois se a toalha estiver seca, corre-se o risco de absorver água além da superfície, retirando-se a água contida nos poros da partícula. Outro cuidado é a determinação da massa da amostra na condição de secura superficial

imediatamente após o procedimento de secagem estar concluído, evitando-se assim a evaporação da água contida nos poros.

Em seguida, procede-se a determinação da massa da amostra submersa em água, cuidando para que todo o ar contido entre as partículas seja expulso.

Retirado o recipiente que contém a amostra de submersão, drena-se o excesso de água e coloca-o na estufa para posterior determinação da massa seca da amostra. A densidade aparente do agregado pode então ser calculada através da Equação 6.3.

Figura 6.6. Secagem Superficial do Agregado Graúdo

$$\rho_{apg} = \frac{A_g}{B_g - C_g} \quad (6.3)$$

onde:

ρ_{apg} : massa específica aparente do agregado graúdo;

A_g : massa da amostra de agregado graúdo seca em estufa, determinada ao ar (g);

B_g : massa da amostra de agregado graúdo seca superficialmente, determinada ao ar (g);

C_g : massa da amostra de agregado graúdo determinada submersa na água (g).

De posse das massas obtidas no decorrer do ensaio, pode-se determinar a porcentagem de água absorvida pelo agregado após 24 horas de imersão e, também, a densidade real do agregado, através das Equações 6.4 e 6.5:

$$Abs_g = \frac{B_g - A_g}{A_g} \times 100 \quad (6.4)$$

$$\rho_{rg} = \frac{A_g}{A_g - C_g} \quad (6.5)$$

onde:

Abs_g : Absorção de água do agregado graúdo (%);

ρ_{rg} : massa específica real do agregado graúdo.

O valor obtido na determinação da densidade aparente e absorção de água do agregado graúdo correspondem à média aritmética entre três determinações, feitas com diferentes amostras de um mesmo agregado.

6.2.4 Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado miúdo

A ASTM C 128 padroniza o método para a determinação da densidade aparente do agregado miúdo, que também permite calcular a porcentagem de água absorvida pelo agregado.

A amostra para o ensaio é composta por cerca de 1000 g de material, constituída inteiramente de agregados finos (passante na peneira 2,36 mm e retido na peneira 0,075 mm). O material é lavado na peneira 0,075 mm e colocado em um recipiente onde água é adicionada em quantidade suficiente para ultrapassar, em pelo menos 2 cm, o nível superior do agregado. O recipiente é deixado em repouso durante 24 horas para permitir a saturação da amostra.

Decorrido o prazo de 24 horas de imersão da amostra, escorre-se o excesso de água, tomando-se cuidado de não perder material. Passa-se o agregado saturado para uma bandeja, espalhando para formar uma camada fina e de espessura uniforme. Inicia-se, então, o processo de secagem do material através da passagem de uma corrente de ar aquecido sobre a bandeja, revirando ao mesmo tempo o agregado para assegurar uma secagem uniforme, como mostrado na Figura 6.7. Essa secagem é feita até que se inicie uma mudança de cor do agregado e suas partículas comecem a desgrudar umas das outras. Quando isso acontece, cessa-se a corrente de ar quente sobre o agregado.

Figura 6.7. Passagem de Corrente de Ar Quente

Utilizando um molde cônico sobre uma superfície plana e horizontal não absorvente, com a abertura maior para baixo, enche-se o molde com agregados, despejando-os pela menor abertura do molde e distribuindo-os regularmente em seu interior. Em seguida, compacta-se

com 25 golpes do soquete, distribuídos uniformemente pela superfície livre do agregado. O soquete deve cair sobre o agregado de uma altura de 5 mm acima do topo da superfície livre do agregado. Em seguida, levanta-se verticalmente o molde, tomando cuidado para não esbarrar no cone de agregados formado. Se a umidade superficial nas partículas do agregado ainda estiver presente, o agregado fino adquire a forma do molde, ou seja, se o cone de agregados compactados não desmoronar parcial ou totalmente, não se terá atingido ainda o ponto de amostra seca superficialmente. Neste caso, continua-se a secagem do material através da corrente de ar quente, como descrito anteriormente, efetuando-se provas cada vez mais freqüentes com o molde cônico, até que seja alcançada a condição de amostra saturada seca superficialmente, que é atingida quando, ao se levantar o molde cônico, o cone de agregado desmorona total ou parcialmente (Figura 6.8).

Figura 6.8. Condição Saturada Seca Superficialmente

Quando a condição de amostra saturada seca superficialmente do agregado é atingida, cerca de 500g do material é transferido para um kitassato modificado, para a obtenção da massa seca superficialmente. Adiciona-se água destilada ao kitassato modificado, até cobrir a amostra. Agita-se, levemente, para obrigar a água a molhar toda a amostra e leva-se o

picnômetro a bomba de vácuo parcial por cerca de 15 a 20 minutos, até que as bolhas de ar sejam eliminadas. Posteriormente, adiciona-se água destilada ao kitassato modificado, até o menisco tangenciar o traço de referência, determinando-se, então, a massa do kitassato modificado mais água mais agregado fino e a temperatura do conjunto contido no kitassato modificado no momento da pesagem.

Depois o agregado fino é removido do interior do kitassato modificado e levado para secar em estufa, até constância de peso. Após o resfriamento da amostra determina-se a massa da amostra seca. A massa específica aparente das partículas de agregados finos é determinada pela Equação 6.6:

$$\rho_{apf} = \frac{A_f}{(B + S_f - D_f)} \quad (6.6)$$

onde:

ρ_{apf} : massa específica aparente do agregado fino;

A_f : massa da amostra de agregado fino seca em estufa (g);

B : massa do kitassato modificado cheio de água, obtida a partir da curva de calibração (g);

S_f : massa da amostra de agregado fino na condição saturada seca superficialmente (g);

D_f : massa do kitassato modificado com agregado fino e água (g).

São determinadas, também, a massa específica real e a absorção das partículas de agregados finos, de maneira similar ao cálculo da massa específica aparente, como se segue (Equações 6.7 e 6.8):

$$\rho_{rf} = \frac{A_f}{(B + A_f - D_f)} \quad (6.7)$$

$$Abs_f = \frac{(S_f - A_f)}{A_f} * 100 \quad (6.8)$$

onde:

prf: massa específica real do agregado fino;

Abs_f: absorção de água do agregado fino (%).

O valor obtido na determinação da densidade aparente e na absorção de água pelo agregado fino corresponde à média aritmética entre três determinações feitas com diferentes amostras de um mesmo agregado.

6.2.5 Determinação da massa específica real do filer

A DNER-ME 085/94 padroniza o método para a determinação da massa específica real de material de enchimento. O ensaio consiste, inicialmente, em colocar no frasco Le Chatelier, mostrado na Figura 6.9, querosene até que seu nível superior fique entre as graduações 0 e 1 ml, enxugando as paredes internas do frasco acima do líquido e faz-se a primeira leitura do nível superior do líquido.

Figura 6.9. Frasco de L Chatelier

Em seguida coloca-se cerca de 60 g do material a ser ensaiado, em pequenas pores, tomando-se o cuidado para que o lquido n ultrapasse a faixa superior da graduao do frasco e que o material n fique aderido s paredes do frasco acima do lquido.

Com a finalidade de expulsar o ar contido no material, coloca-se o frasco numa posio inclinada e aplicam-se movimentos giratrios suaves. Quando n aparecerem mais bolhas de ar na superfcie do lquido a leitura final feita, sendo que as duas leituras devem ser realizadas com a temperatura diferindo, no mximo, de 0,2C.

A diferena entre as leituras inicial e final representa o volume do lquido deslocado pelo material ensaiado, e a massa especfica real calculada pela Equao 6.9:

$$\rho_{r\acute{f}iler} = \frac{M_{f\acute{f}iler}}{Vol_{desl}} \quad (6.9)$$

onde:

ρ_{filer} : massa específica real do filer (g/cm^3);

M_{filer} : massa do material (g);

Vol_{desl} : volume do líquido deslocado (cm^3).

A diferença entre dois resultados em amostras similares de um mesmo material não deve diferir mais que $0,009 \text{ g}/\text{cm}^3$.

6.3 PICNOMETRIA DE GÁS

O picnômetro de gás determina o volume verdadeiro de um sólido, mesmo que poroso, por variação da pressão de gás conhecido (WEBB e ORR, 1997). Normalmente utiliza-se gás hélio porque este gás, além de inerte, penetra facilmente nos poros (acessíveis) da amostra, devido ao pequeno tamanho dos seus átomos, permitindo assim determinar o volume do sólido com mais rigor.

A picnometria de hélio é uma técnica de caracterização largamente utilizada para determinar a densidade real dos materiais na forma de pós. Essa técnica está baseada no princípio de Arquimedes de deslocamentos de fluidos. O fluido é um gás que penetra nos poros mais finos e por isso adquire uma máxima precisão. Por essa razão o gás hélio é recomendado, pois as pequenas dimensões atômicas asseguram uma penetração entre as cavidades e poros com dimensões de aproximadamente 1 Angstromns (BORASCHI *et al.*, 1996).

As duas principais vantagens do picnômetro de hélio sobre o tradicional picnômetro com líquido são: facilidade e rapidez. A facilidade é dada pela capacidade de penetração do gás

hélio entre as partículas e a velocidade para penetrar nos espaços tão pequenos e diminutos é quase instantânea, por mais fino que seja o pó, aumentando ainda mais o grau de dificuldade (REED, 1996).

O picnômetro de hélio é constituído por duas câmaras de volumes conhecidos (por calibração prévia): a câmara onde se coloca a amostra e a câmara de expansão, ligadas por uma válvula (válvula de expansão). Na Figura 6.10 tem-se o picnômetro utilizado na pesquisa e a Figura 6.11 mostra as massas utilizadas para calibração do sistema.

Figura 6.10. Picnômetro de gás hélio

Figura 6.11. Massas utilizadas para calibração do sistema

Antes de iniciar a análise propriamente dita, a amostra colocada na respectiva câmara é sujeita a um processo de desgaseificação que consiste em repetidas purgas com hélio, para remoção de impurezas e umidade que eventualmente possa conter. Depois de levado todo o sistema à pressão atmosférica, isola-se a câmara de expansão, fechando a válvula de expansão e pressuriza-se a câmara que contem a amostra até uma pressão P_1 (cerca de 17 psi). Em seguida a válvula de expansão é aberta e, em consequência ocorre um abaixamento de pressão para P_2 . Admitindo comportamento ideal do hélio, o volume do sólido pode ser calculado a partir da Equação 6.10 (SMITH, 1996):

$$P_1(V_a - V_s) = P_2(V_a - V_s + V_e) \quad (6.10)$$

onde:

$$V_s = V_a - \frac{V_e}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \quad (6.11)$$

e

V_a : volume da câmara da amostra;

V_e : volume da câmara de expansão;

V_s : volume do sólido.

A massa do volume é automaticamente calcula pelo aparelho através da relação entre a massa do sólido e o volume derivado da Equação 6.11.

6.4 DOSAGEM MARSHALL

A primeira etapa para a execução dos corpos-de-prova é o peneiramento, que é realizado após a secagem dos agregados em estufa e a utilização das peneiras de abertura de 25,0; 19,0; 12,5; 9,5; 4,75; 2,36; 1,18; 0,60; 0,30; 0,15; 0,075 mm. As frações são recombinações de acordo com a curva granulométrica determinada pelo Método Bailey. As dosagens Marshall são realizadas considerando-se os critérios volumétricos estabelecidos pelo Superpave quanto ao volume de vazios. São utilizados, neste trabalho, dois tipos de fileres, pó de pedra e as cinzas (resíduo). As dosagens das misturas são realizadas de acordo com o procedimento estabelecido pela NBR 12891, utilizando-se uma energia de compactação de 75 golpes por face do corpo-de-prova.

A Norma ASTM D 2493 estabelece intervalos de temperatura para usinagem e compactação do concreto asfáltico para o ensaio Marshall. Esses intervalos estão definidos em função da relação temperatura-viscosidade. A temperatura apropriada para usinagem é aquela na qual o CAP apresenta uma viscosidade Brookfield de 170 ± 20 cP, enquanto que a temperatura de compactação é aquela em que o CAP apresenta uma viscosidade Brookfield de 280 ± 30 cP.

A curva de viscosidade versus temperatura do ligante asfáltico está demonstrada na Figura 6.12 e, através dela, determina-se a temperatura de mistura e de compactação. A temperatura de aquecimento do agregado deve ser 15° C acima da do ligante asfáltico (Tabela 6.5).

Figura 6.12. Curva Viscosidade Brookfield versus Temperatura do Ligante Asfáltico

Tabela 6.5 - Temperaturas do Ligante Asfáltico, do Agregado e de Compactação.

	Temperatura (°C)	Temperatura Média (°C)
Agregado Mineral	163 a 170	166
Ligante Asfáltico	148 a 154	151
Compactação	136 a 142	139

Deve ser determinado o teor ótimo provável de ligante asfáltico através do método da superfície específica, que consiste em calcular a superfície específica dos agregados, através da Equação 6.12, e o teor estimado ótimo de ligante asfáltico, de acordo com a Equação 6.13. Para a dosagem Marshall são escolhidos dois teores abaixo e dois teores acima do teor ótimo provável.

$$S = \frac{0,17 \times G + 0,33 \times g + 2,30 \times A + 12,00 \times a + 135,00 \times f}{100} \quad (6.12)$$

onde:

S: superfície específica do agregado (m^2/kg);

G: porcentagem retida na peneira 9,5 mm;

g: porcentagem passada na peneira 9,5 mm e retida na peneira 4,76 mm;

A: porcentagem passada na peneira 4,76 mm e retida na peneira 0,30 mm;

a: porcentagem passada na peneira 0,30 mm e retida na peneira 0,075 mm;

f: porcentagem passada na peneira 0,075 mm.

$$P_{ca} = \frac{100 \times T'_{ca}}{100 + T'_{ca}} \quad (6.13)$$

onde:

P_{ca} : porcentagem de ligante asfáltico (%);

T'_{ca} : teor de ligante asfáltico corrigido (%).

Para o cálculo de T'_{ca} utilizam-se as Equações 6.14 e 6.15:

$$T'_{ca} = \frac{2,65 \times T_{ca}}{\delta_{am}} \quad (6.14)$$

onde:

T'_{ca} : teor de ligante asfáltico corrigido (%);

T_{ca} : teor de ligante asfáltico (%);

δ_{am} : densidade real do agregado mineral.

$$T_{ca} = m\sqrt[5]{S} \quad (6.15)$$

onde:

m: módulo de riqueza em asfalto, variável de 3,75 a 4,00 para pavimentos rodoviários (adota-se 3,75 quando se exige nas capas de rolamento máxima resistência à deformação por compressão e 4,00 para capas que necessitam ter maior flexibilidade).

Antes do processo de compactação os moldes devem ser colocados em estufa, na temperatura de compactação, e o ligante deve ser aquecido em estufa por duas horas. A mistura do agregado com o ligante asfáltico é realizada individualmente. Depois de realizada a mistura do corpo-de-prova, individualmente, a mistura asfáltica resultante é levada à estufa, onde permanece por duas horas na temperatura de compactação, conforme estabelece a norma AASHTO PP2.

Depois das duas horas inicia-se a compactação, com 75 golpes por face do corpo-de-prova, com o compactador Marshall, mostrado na Figura 6.13. Após a compactação os corpos-de-prova permanecem nos moldes cilíndricos durante três horas, para que ocorra o resfriamento da mistura e obtenção de consistência dos corpos-de-prova. Depois de extraídos dos moldes os corpos-de-prova devem ficar 24 horas sobre uma superfície plana para posterior pesagem da massa ao ar e massa imersa, para a determinação dos elementos para o cálculo das características volumétricas.

Figura 6.13. Compactador Marshall

6.4.1 Propriedades Volumétricas

A primeira propriedade a ser determinada é a densidade aparente dos corpos-de-prova, após determinação da massa ao ar e a massa imersa. Para isso é utilizada a Equação 6.16:

$$Dap = \frac{Ma}{Ma - Mi} \quad (6.16)$$

onde:

Dap: densidade aparente do corpo-de-prova;

Ma: massa ao ar do corpo-de-prova (g);

Mi: massa imersa do corpo-de-prova (g).

A densidade máxima teórica da mistura (DMT) é calculada utilizando-se as massas específicas e as porcentagens na mistura de ligante e agregado, através da Equação 6.17:

$$DMT = \frac{1}{\left(\frac{CAP_p}{\rho_{CAP}} + \frac{AG_p}{\rho_{AG}} \right)} \times \rho_{\text{água}} \quad (6.17)$$

onde:

DMT: densidade máxima teórica da mistura;

CAP_p: quantidade do ligante asfáltico na mistura (%);

ρ_{CAP}: massa específica do ligante asfáltico (g/cm³);

AG_p: quantidade de agregados na mistura (%);

ρ_{AG}: massa específica dos agregados (g/m³);

ρ_{água}: massa específica da água = 1 g/cm³.

Quando se utiliza a densidade aparente considera-se que nenhuma quantidade de asfalto é absorvida pelos poros existentes no agregado, ou seja, o volume dos vazios preenchidos pelo asfalto está incluído como parte do volume da película do agregado, resultando em uma mistura com volume de vazios menor do que ela realmente possui; e quando se utiliza a densidade real dos agregados leva-se em conta somente o volume da massa sólida do agregado e os poros permeáveis à água passam a fazer parte do volume de vazios da mistura, o que resulta em um valor de volume de vazios maior do que a mistura apresenta. Gouveia (2002) recomenda a densidade efetiva do agregado para resultados mais precisos, que pode ser determinada através do Método Rice, que também determina a quantidade de ligante asfáltico absorvido; esse método foi utilizado nesta pesquisa.

O volume de vazios (V_v) é definido como os espaços existentes entre as partículas de agregados cobertos por uma película de asfalto, ou o volume de ar expresso como uma percentagem do volume total da mistura, como mostra a Equação 6.18:

$$V_v = \left(1 - \frac{Dap}{DMT}\right) \times 100 \quad (6.18)$$

onde:

V_v : volume de vazios (%).

O conceito de vazios do agregado mineral é a quantidade de vazios na mistura compactada que é preenchida por ar ou ligante efetivo, ou seja, não absorvido. A equação que determina o VAM é dada na Equação 6.19 ou 6.20:

$$VAM = 100 - \left(1 - \frac{Dap \times (1 - CAP_p)}{\rho_{AG}} \times \rho_{\text{água}}\right) \times 100 \quad (6.19)$$

$$VAM = V_v + V_{ca} \quad (6.20)$$

onde:

VAM: vazios do agregado mineral (%);

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água = 1 g/cm³;

V_{ca} : volume de vazios preenchido pelo ligante asfáltico (%).

A relação betume-vazios (RBV) é definida como a porcentagem dos vazios do agregado mineral que contém ligante asfáltico, ou seja, a porcentagem de vazios que é preenchida por ligante e que representa o volume efetivo de ligante (Equações 6.21):

$$RBV = \frac{VAM - V_v}{VAM} \times 100 \quad (6.21)$$

onde:

RBV: relação betume-vazios (%).

6.4.2 Estabilidade e Fluência Marshall

Para os ensaios de estabilidade (E) e fluência (F) Marshall os corpos-de-prova são imersos num banho de água a 60° C, durante cerca de 20 minutos. Após, são imediatamente submetidos ao ensaio de compressão diametral, na forma idealizada por Marshall, para a determinação da estabilidade, que corresponde à carga de ruptura (N), e da fluência, que corresponde à deformação sofrida pelo corpo-de-prova até o momento da ruptura (mm). A Figura 6.14 mostra a prensa do ensaio de compressão diametral, idealizado por Marshall.

Figura 6.14. Prensa para Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall

6.5 DENSIDADE MÁXIMA TEÓRICA E ABSORÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS ATRAVÉS DO MÉTODO RICE

As amostras para a determinação das densidades máximas teóricas (DMT) através do método Rice são preparadas de acordo com a curva granulométrica e o teor de trabalho de ligante asfáltico. O procedimento de mistura da amostra é semelhante ao de preparação dos corpos-de-prova Marshall, exceto pela não compactação. A absorção de ligante asfáltico pelo agregado dá-se pela permanência da amostra por 2 horas em estufa na temperatura de compactação, conforme a AASHTO PP2.

Após a amostra ser retirada da estufa, é resfriada manualmente, com uma espátula, para evitar a formação de grumos (Figura 6.15).

Figura 6.15. Preparação da Amostra para o Ensaio de Absorção

Depois de resfriada, verifica-se a massa seca da amostra. Em seguida coloca-se a amostra em um kitassato modificado, adiciona-se água destilada até cobrir completamente a massa. Após isso, conecta-se o conjunto kitassato modificado, amostra e água à bomba de vácuo parcial, durante aproximadamente 15 a 20 minutos para que sejam retiradas as bolhas de ar.

Extraídas todas as bolhas, completa-se o kitassato modificado com água destilada, tomando-se o cuidado para não incorporar ar na água, e verifica-se a massa do conjunto (Figura 6.16). Por fim, mede-se a temperatura da água dentro do kitassato modificado.

Figura 6.16. Conjunto Kitassato Modificado, Água e Mistura Asfáltica

O cálculo da Densidade Máxima Teórica (DMT) de cada mistura asfáltica dá-se pela Equação 6.22.

$$DMT_R = \frac{A}{A + D - E} \quad (6.22)$$

onde:

DMT_R: densidade máxima teórica da mistura, determinada pelo Método Rice;

A: massa da amostra seca (g);

D: massa do kitassato modificado preenchido com água, em função da temperatura, de acordo com a curva de calibração (g);

E: massa do conjunto kitassato modificado, água e amostra (g).

Com isso, pode-se determinar a massa específica efetiva do agregado (ρ_{ef}), que por definição é a relação entre a massa do agregado e seu volume efetivo, através da Equação 6.23.

$$\rho_{ef} = \frac{1 - CAP_p}{\frac{1}{\rho_{água}} \times \frac{1}{DMT_R} - \frac{CAP_p}{\rho_{CAP}}} \quad (6.23)$$

onde:

ρ_{ef} : massa específica efetiva do agregado (g/cm³);

$\rho_{água}$: massa específica da água = 1 g/cm³ (adotada);

ρ_{CAP} : massa específica do ligante asfáltico (g/cm³);

DMT_R: densidade máxima teórica da mistura, determinada pelo Método Rice;

CAP_p: quantidade de ligante asfáltico na mistura (%).

Também por definição, tem-se que a absorção de ligante asfáltico pelo agregado (A_{abs}) é dada pela relação entre a massa de asfalto absorvida e a massa do agregado da mistura, podendo ser determinada através da Equação 6.24.

$$A_{abs} = \left(\frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ef} \times \rho_{ap}} \times \rho_{CAP} \right) \times 100 \quad (6.24)$$

onde:

A_{abs} : porcentagem de ligante asfáltico absorvido por massa de agregado (%);

ρ_{ap} : massa específica aparente do agregado (g/cm^3).

6.6 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

6.6.1 Ensaio de Módulo de Resiliência

Segundo o DNER, o módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano vertical de uma amostra cilíndrica de misturas asfáltica, e a deformação específica recuperável (ϵ_t), correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T).

Os materiais que compõe a estrutura de um pavimento, quando sujeitos a carregamentos dinâmicos de curta duração e submetidos a tensões muito abaixo de sua plastificação, exibem comportamento elástico e não necessariamente linear. O módulo de resiliência é o módulo de elasticidade obtido por meio de ensaios laboratoriais, aplicando carregamentos repetidos nos

corpos-de-prova, simulando a situação em campo de passadas rápidas e repetidas das rodas dos veículos.

Estudos realizados na Universidade do Texas (GONZALEZ *et al.*, 1975) para avaliar os métodos frequentemente utilizados em laboratórios para estimar as propriedades fundamentais dos materiais, considerando os ensaios de módulo dinâmico (complexo), de módulo de resiliência com carga axial, de módulo de resiliência à flexão e módulo de resiliência à tração indireta, concluíram que o ensaio de tração indireta por compressão diametral é o mais indicado para a determinação das características resilientes das misturas asfálticas.

Segundo Queiroz e Visser (1978), o conhecimento do módulo de resiliência do revestimento de um pavimento flexível é um importante parâmetro para a determinação do número de repetições do eixo padrão que esse pavimento pode suportar, até a ruptura por fadiga.

O ensaio de módulo de resiliência visa simular condições encontradas no campo, onde os materiais que constituem o revestimento asfáltico são submetidos a carregamentos de curta duração originados pela ação do tráfego. A deformação específica resiliente, ou recuperável, é medida por um *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT) acoplado a um sistema de aquisição de dados e posicionado no plano perpendicular ao sentido do carregamento; dessa forma, consegue-se avaliar o comportamento da mistura na zona onde ocorrem as deformações de tração, responsáveis pela fadiga da camada (MOURÃO, 2003).

O modelo de resiliência é obtido através do ensaio de compressão diametral dinâmico, ou ensaio de tração indireta, normalizado pelo DNER ME 133.

As alturas dos corpos-de-prova, determinadas utilizando-se um paquímetro com resolução de centésimo de milímetro, correspondem à média entre três medições efetuadas em cada corpo-de-prova. Após serem medidos, os corpos-de-prova permanecem por, no mínimo, 48 horas a 25°C, em uma sala climatizada, até a realização do ensaio.

O ensaio foi realizado a 25° C, com aplicação de 100 ciclos de carregamento, sendo cada ciclo com duração de 1 segundo, com 0,1 s de aplicação de carga e 0,9 s de recuperação. A magnitude da carga aplicada é de 25 a 30% da resistência à tração do corpo-de-prova, determinada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

O módulo de resiliência das misturas é calculado através da Equação 6.25:

$$MR = \frac{F}{\Delta \times H} \times (0,9976 \times \mu + 0,2692) \quad (6.25)$$

onde:

MR: módulo de resiliência (MPa);

F: carga vertical, repetidamente aplicada diametralmente no corpo-de-prova (N);

Δ : deslocamento total, correspondente à deformação elástica sofrida pelo corpo-de-prova na direção perpendicular à aplicação de carga (mm);

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

μ : coeficiente de Poisson.

Barksdale *et al.* (1997), sugerem que o coeficiente de Poisson deve estar entre 0,25 e 0,45, para o ensaio realizado a uma temperatura de 25°C. Medina (1997) sugere que seja adotado o valor de 0,30 para o coeficiente de Poisson.

6.6.2 Resistência à Tração

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral ou tração indireta, conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para determinar a resistência à tração de corpos-de-prova de concreto através de carregamento estático.

O ensaio consiste em submeter corpos-de-prova a uma compressão diametral, recebendo cargas de compressão distribuídas ao longo de duas geratrizes opostas, que vai sendo aumentada progressivamente, até que haja a ruptura do corpo-de-prova (não há esmagamento) ao longo de um plano diametral.

Esta forma de carregamento gera uma tensão de tração normal à direção da carga aplicada e ao longo do plano diametral vertical (Figura 6.17). As tensões de tração na direção perpendicular à direção de aplicação da carga são praticamente constantes ao longo do diâmetro e a ruptura ocorre com um estado de tensões tal que $\sigma_t / \sigma_c = 1:3$.

Esse método tem sido utilizado para a determinação de propriedades mecânicas de misturas asfálticas (módulo de resiliência, resistência à tração, coeficiente de Poisson). O ensaio é feito segundo a norma DNER-ME 138/96, que estabelece o método para determinar a resistência à tração por compressão diametral de misturas asfálticas, de utilidade para projetos de pavimentos flexíveis.

Figura 6.17. Estado de Tensões no Carregamento Diametral

Determinada através do ensaio normalizado pelo DNER ME 138, é utilizada para definição da carga que deve ser aplicada nos ensaios de módulo de resiliência por compressão diametral e fadiga de misturas asfálticas. O ensaio realizado, nesta pesquisa a 25°C, consiste na aplicação progressiva de carga de compressão diametral estática até a ruptura do corpo-de-prova.

A Equação 6.26 fornece o valor da resistência à tração de cada corpo-de-prova:

$$RT = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (6.26)$$

onde:

RT: resistência à tração (MPa);

F: carga de ruptura (N);

D: diâmetro médio do corpo-de-prova (mm);

H: altura média do corpo-de-prova (mm).

6.6.3 Ensaio de Fadiga

De um modo geral, a fadiga e a deformação permanente são os principais defeitos nas camadas asfálticas, sendo, inclusive, os maiores responsáveis pela redução da vida útil de um pavimento. A fadiga na camada asfáltica é a subtração gradativa de sua resistência com posterior trincamento (ruptura), por efeito de solicitações repetidas das cargas do tráfego. O parâmetro estrutural responsável por essa deficiência é a tensão de tração horizontal que se desenvolve na face inferior do revestimento.

Segundo Pinto (1991), o principal defeito nos pavimentos rodoviários brasileiros tem como causa o fendilhamento por fadiga, decorrente das solicitações repetidas do tráfego, em conjunto com a elevada resiliência das camadas de base e sub-base granulares.

Há dois tipos de ensaio de fadiga: com tensão controlada e deformação controlada. No ensaio de fadiga por compressão diametral com tensão controlada a carga aplicada é mantida constante e as deformações resultantes aumentam no decorrer do ensaio, com critério de parada está vinculado à ruptura completa do corpo-de-prova. No ensaio à deformação controlada (deformação constante e diminuição do carregamento ao longo do ensaio), o critério de parada não está associado à fratura completa da amostra, mas ao número de solicitações capaz de reduzir a carga necessária para manter a deformação constante, em 40 a 50% da carga inicial, ou reduzir a rigidez inicial da amostra a um valor determinado previamente.

O ensaio realizado nesta pesquisa é o de tensão controlada, que consiste na aplicação de um carregamento com duração de 0,1 com 0,9 segundo de intervalo para representar o tempo

entre a aplicação de uma roda e outra. O corpo de prova é sujeito a um estado bi-axial de tensões. A carga a ser aplicada depende da resistência à tração da mistura (RT), determinada no ensaio de resistência à tração estática. Geralmente, realiza-se o ensaio por compressão diametral com cargas entre 10 e 40% da RT. O critério de parada é a ruptura completa ou um deslocamento de 6 mm.

O ensaio é realizado a 25°C e os corpos-de-prova ficam acondicionados na temperatura de ensaio por pelo menos 24 horas. O posicionamento do corpo-de-prova no suporte é como no ensaio de resistência à tração, a aquisição dos deslocamentos é realizada com o uso de um LVDT e os dados são captados e armazenados com o uso de um programa desenvolvido em LabView. A Figura 6.18 mostra o esquema do ensaio de fadiga, com a ruptura do corpo-de-prova diametralmente.

Figura 6.18. Esquema do ensaio de fadiga

Para a determinação do carregamento vertical, de acordo com a RT e o nível de tensão, é utilizada a Equação 6.27:

$$F = \frac{100 \times \pi \times D \times H \times (\%RT)}{2} \quad (6.27)$$

onde:

F: carga aplicada (N);

D: diâmetro do corpo-de-prova (cm);

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

%RT: nível de carga em relação à resistência à tração.

As tensões encontradas no centro do corpo-de-prova, a diferença de tensões e a deformação resiliente são determinadas pelas Equações 6.28, 6.29, 6.30 e 6.31

$$\sigma_t = \frac{2 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (6.28)$$

$$\sigma_c = \frac{-6 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (6.29)$$

$$\Delta\sigma = \frac{8 \times F}{100 \times \pi \times D \times H} \quad (6.30)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\%RT}{MR} \quad (6.31)$$

onde:

σ_t : tensão de tração (MPa);

σ_c : tensão de compressão (MPa);

$\Delta\sigma$: diferença de tensões no centro do corpo-de-prova (MPa);

ε_r : deformação resiliente;

RT: resistência à tração (MPa);

MR: módulo de resiliência (MPa).

A representação das curvas de fadiga é feita em um gráfico dilog, com os números de solicitações de carga que levam à ruptura do corpo-de-prova nas ordenadas e as diferenças de tensões e deformações que levam à ruptura nas abscissas. A curva de fadiga para o material é determinada com as Equações 6.32 e 6.33:

$$N_T = k_1 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{k_2} \quad (6.32)$$

$$N_D = k_3 \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right)^{k_4} \quad (6.33)$$

onde:

N_T : número de aplicações de carga até a ruptura do corpo-de-prova, em função da diferença de tensões;

N_D : número de aplicações de carga até a ruptura do corpo-de-prova, em função da deformação resiliente;

$\Delta\sigma$: diferença de tensões no centro do corpo-de-prova (MPa);

ε_r : deformação resiliente;

k_1, k_2, k_3, k_4 : parâmetros determinados por regressão no ensaio de vida de fadiga.

6.6.4 Dano por Umidade Induzida

Esse ensaio avalia a alteração do comportamento da mistura asfáltica submetida a um dado condicionamento, em função da variação de uma propriedade mecânica, a resistência à tração por exemplo. A avaliação é feita de forma comparativa, entre grupos condicionado e não condicionado, com misturas similares. O ensaio é um instrumento de leitura da variação de uma dada propriedade da mistura frente a um condicionamento.

O ensaio surgiu da necessidade de avaliar o efeito da perda de adesividade no comportamento e durabilidade das misturas, avaliando a variação de alguma propriedade da mistura quando submetida a esforços que resultassem na tração e no descolamento da película.

Segundo Furlan *et al.* (2004), a sensibilidade das misturas à umidade associa-se a dois mecanismos que se interrelacionam: a perda de adesão e a perda de coesão. A perda de adesão deve-se à existência de água entre o asfalto e o agregado, sendo que a superfície do agregado tem maior afinidade pela água do que o asfalto; desta forma a água fica entre a película asfáltica e o agregado, rompendo o vínculo adesivo entre eles, deixando o agregado sem proteção, causando o descolamento do filme de asfalto. Já a perda de coesão se dá devido ao enfraquecimento do asfalto na presença de água, que diminui a resistência da união asfalto/agregado, causando uma redução severa na resistência e integridade da mistura; também pode ser visualizada em termos de desligamento entre o asfalto e a superfície do agregado e esse mecanismo depende de fatores, como: temperatura, viscosidade e composição do asfalto, tipo de agregado e espessura da película asfáltica.

A durabilidade de uma mistura asfáltica depende do grau de adesão entre o cimento asfáltico e o agregado, podendo ser comprometida pela presença de água ou de umidade no seu interior. O fator mais comumente atribuído como origem dos problemas de uma mistura asfáltica é a água, que atua de forma diferenciada, mas sempre danosa, por isso, em grande parte dos ensaios há água como agente causador do dano na mistura, aliada, por vezes, a variações térmicas e/ou carregamentos cíclicos.

Os fatores que podem influenciar o dano por umidade são: características do concreto asfáltico, abrangendo o agregado, o cimento asfáltico e o tipo de mistura; as condições climáticas e os efeitos ambientais durante e após a construção e a drenagem sub-superficial do pavimento.

O principal ensaio utilizado na avaliação dos danos por umidade das misturas asfálticas é o de resistência à tração por compressão diametral, justificada pelo fato de refletir o esforço ao qual a película de asfalto é submetida quando descolada e o ensaio também apresenta sensibilidade suficiente para diagnosticar variações na resistência ou perdas de coesão da mistura. A resistência à tração retida deve ser, no mínimo, de 80 % para aceitação da mistura.

O ensaio é realizado segundo a AASHTO T 283, sendo que os corpos-de-prova são preparados seguindo o método Marshall e o procedimento está descrito a seguir:

- Saturação dos corpos-de-prova entre 55 e 80%, aplicando-se uma pressão de 254-660 mmHg;
- Congelamento a -18°C por um período de 16 ± 1 h, sendo os corpos-de-prova cobertos por um filme plástico e colocados em um recipiente vedado com 10 ml de água;

- Imersão em banho a 60°C por um período de 24 ±1 h, após retirado do filme e do recipiente;
- Imersão em banho a 25°C por um período de 2h ±10 min;
- Realização do ensaio de resistência à tração (RTC).

O cálculo da resistência à tração retida (RTR) por umidade induzida é a razão entre a resistência à tração após o condicionamento (RTC) e a resistência à tração antes do condicionamento (RT), pela Equação 6.34.

$$RTR = \frac{RTC}{RT} \times 100 \quad (6.34)$$

Também pode ser realizado o ensaio de módulo de resiliência para avaliação do dano por umidade induzida como alternativa ao uso do ensaio de resistência à tração na avaliação do efeito da umidade. Este procedimento é muitas vezes adotado por ser rápido e não destrutivo, podendo-se avaliar o módulo de resiliência dos corpos-de-prova antes e após serem submetidos ao condicionamento, o que não é possível com o ensaio de resistência à tração, que, por ser um ensaio destrutivo, avalia a variação da propriedade em termos de valores médio dos grupos.

6.7 ENSAIOS AMBIENTAIS

Alguns ensaios são necessários para a verificação se as cinzas da queima da madeira podem contaminar ou não o meio ambiente, trazendo risco à saúde, sendo eles:

- Massa bruta, conforme ABNT – NBR 10004: 2004;

- Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos: conforme ABNT – NBR 10005:2004;
- Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, conforme ABNT – NBR 10006:2004.

6.7.1 Ensaio de massa bruta

Segundo a ABNT - NBR 10000:2004, os resíduos sólidos são definidos como resíduos nos estados sólidos, semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e varrição. A periculosidade de um resíduo está ligada as suas características, que podem apresentar risco à saúde pública ou riscos ao meio ambiente (quando gerenciado de maneira incorreta).

A classificação de um resíduo envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

Conforme a ABNT – NBR 10004:2004 os resíduos são classificados em:

- Resíduo classe I – Perigosos: aqueles que apresentam periculosidade, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, provocando ou contribuindo para o aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.. Além da periculosidade, podem apresentar uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;

- Resíduo classe II – Não perigosos, que estão subdivididos em:
 - Resíduo classe II A – Não inertes: aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduo classe I (perigosos) ou de resíduo classe II B (inertes), podendo ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;
 - Resíduo classe II B – Inertes: quaisquer resíduo que, quando amostrado de forma adequada e submetidos a um contato estático ou dinâmico com a água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, segundo ensaio de solubilização, não apresentarem nenhum de seus constituintes solubilizado em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os aspectos de aspecto, cor, turbidez, sabor e dureza.

6.7.2 Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos

O ensaio de lixiviação de resíduos é executado com o objetivo de separar substâncias contaminantes ou não, do meio ambiente, por meio de lavagem ou percolação e desta forma classificar o resíduo conforme o seu potencial contaminante.

6.7.3 Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos

O ensaio de solubilização de resíduo é realizado para diferenciar os resíduos da classe II A (não inerte) dos resíduos classe II B (inertes), sendo aplicado somente para o resíduo no estado físico sólido.

CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Foram realizados os ensaios de massa específica solta e compactada do agregado graúdo - pedra 1 e pedrisco; massa específica compactada do agregado fino - pó; massa específica real, aparente e absorção do agregado graúdo; massa específica real, aparente e absorção do agregado fino e massa específica do filer mineral. Os resultados desses ensaios estão representados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Características Físicas dos Agregados

Ensaio	Pedra 1	Pedrisco	Pó	Filer Mineral
Massa específica real (g/cm^3)	2,965	2,976	3,068	2,853
Massa específica aparente (g/cm^3)	2,828	2,810	2,844	-
Absorção (%)	1,635	1,986	2,570	-
Massa específica solta (kg/m^3)	1452	1351	-	-
Massa específica compactada (kg/m^3)	1629	1493	1879	-

7.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

Primeiramente, foi realizado o ensaio de determinação da massa específica do material de enchimento (DNER-ME 085/94), mas o material flutuou no líquido, o querosene, que tem densidade média 0,8. Também foi realizada nova tentativa com outro líquido de baixa densidade, o álcool, mas o resíduo também flutuou.

Então, decidiu-se realizar ensaio através de um método que determinasse densidades baixas, tendo sido escolhido o de picnometria de gás hélio. A determinação da densidade real do material foi realizada conforme a norma ISO 1183-3 – “*Plastics – Methods for determining the density of non-cellular plastics – Part 3: Gas pycnometer method*”. O ensaio foi realizado no laboratório do Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais - CCDM, na Universidade Federal de São Carlos. O equipamento utilizado foi o modelo Ultrapycnometer 1000, da Quantachrome.

A Tabela 7.2 apresenta os valores das cinco medidas e da média da densidade real do resíduo – cinzas.

Tabela 7.2 - Valores de densidade real do resíduo – cinzas					
Medidas					Média
1	2	3	4	5	
2,463	2,343	2,286	2,264	2,256	2,322±0,086

7.3 CURVA GRANULOMÉTRICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A curva granulométrica foi determinada através do método Bailey, para misturas contendo 3,5% de filler - material passante na peneira de 0,075 mm - estando representada na Tabela 7.3 e na Figura 7.1.

Como será mostrado nos resultados da Dosagem Marshall, os corpos-de-prova compostos pela curva granulométrica determinada através do Método Bailey não alcançaram o volume de vazios recomendado, determinado pela Especificação Superpave. Acredita-se que isso ocorreu devido à pequena quantidade de material fino na mistura, ou seja, passante na peneira de abertura 2,36 mm.

Tabela 7.3 - Curva Granulométrica Bailey (3,5% de filer)

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passada acumulada
25,0	100,0
19,0	95,0
12,5	70,0
9,5	67,2
4,75	43,2
2,36	23,5
1,18	15,3
0,60	10,9
0,30	8,3
0,15	5,5
0,075	3,5

Figura 7.1. Curva Granulométrica Bailey (3,5% de filer)

Com isso, escolheu-se uma curva granulométrica que contivesse uma quantidade maior de agregado fino, passando acima da zona de restrição da Especificação Superpave. A curva granulométrica utilizada é apresentada na Tabela 7.4 e na Figura 7.2, para uma quantidade de filer de 3,5%.

Tabela 7.4 - Curva Granulométrica Acima da Zona de Restrição (3,5% de filer)

Abertura Peneiras (mm)	Porcentagem passada acumulada
25	100,0
19	95,0
12,5	85,0
9,5	75,0
4,75	55,0
2,36	40,0
1,18	30,0
0,6	21,0
0,3	16,0
0,15	10,0
0,075	3,5

Figura 7.2. Curva Granulométrica Acima da Zona de Restrição (3,5% de filer)

Da mesma maneira, foi escolhida uma curva granulométrica para a quantidade de filer de 6,0%, passando acima da zona de restrição da Especificação Superpave (Tabela 7.5 e Figura 7.3). O Método Bailey foi realizado, mas a quantidade de material fino também foi pequena, optando-se por seguir o mesmo realizado anteriormente com a quantidade de filer de 3,5%.

Tabela 7.5 - Curva Granulométrica Acima da Zona de Restrição (6,0% de filler)

Abertura peneiras (mm)	Porcentagem passada acumulada
25	100,0
19	95,0
12,5	85,0
9,5	75,0
4,75	55,0
2,36	40,0
1,18	30,0
0,6	21,0
0,3	16,0
0,15	10,0
0,075	6,0

Figura 7.3. Curva Granulométrica Acima da Zona de Restrição (6,0% de filler)

7.4 DOSAGEM MARSHALL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A dosagem Marshall é realizada com o intuito de obter o teor ótimo de ligante asfáltico para a composição dos corpos-de-prova. Os parâmetros obtidos na dosagem são: densidade aparente (Dap), volume de vazios (Vv), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV), estabilidade (N) e fluência (mm). O teor ótimo de ligante asfáltico é aquele correspondente a um volume de vazios de 4%.

A Tabela 7.6 mostra a média dos parâmetros obtidos na dosagem Marshall, contendo 3,5% de filler e curva granulométrica determinada pelo Método Bailey. As Figuras 7.4 a 7.9 representam graficamente esses resultados.

Tabela 7.6 - Dosagem Marshall (Método Bailey – 3,5% de filler)						
% CAP	Dap	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (N)	Fluência (mm)
3,5	2,492	9,271	17,883	48,156	13060,00	2,190
4,0	2,483	8,830	18,633	52,621	10670,00	2,713
4,5	2,459	8,907	19,830	55,092	8913,33	2,517
5,0	2,456	8,221	20,344	59,602	10206,67	2,627
5,5	2,418	7,797	20,924	62,740	10765,00	2,635
6,0	2,410	7,014	21,289	67,070	11415,00	2,835
6,5	2,430	5,799	21,389	72,903	13020,00	2,995

Figura 7.4. Dosagem Marshall – Densidade aparente *versus* teor de asfalto (Método Bailey)

Figura 7.5. Dosagem Marshall – Volume de vazios *versus* teor de asfalto (Método Bailey)

Figura 7.6. Dosagem Marshall – Vazios do agregado mineral *versus* teor de asfalto (Método Bailey)

Figura 7.7. Dosagem Marshall – Relação betume-vazios *versus* teor de asfalto (Método Bailey)

Figura 7.8. Dosagem Marshall – Estabilidade *versus* quantidade de ligante (Método Bailey)

Figura 7.9. Dosagem Marshall – Fluência *versus* quantidade de ligante (Método Bailey)

Como se pode perceber, o volume de vazios não alcançou os 4% recomendados pela especificação, mesmo aumentando-se o teor de asfalto até 6,5% (dois teores acima do recomendado pelo Método de dosagem Marshall). Com a mudança na curva granulométrica (passando acima da Zona de Restrição), para a quantidade de filer de 3,5%, os resultados das médias dos parâmetros da nova dosagem Marshall estão apresentados na Tabela 7.7 e nas Figuras 7.10 a 7.15. O teor ótimo de ligante asfáltico, obtido para um volume de vazios de 4%, foi de 5,85%.

Tabela 7.7 - Dosagem Marshall (3,5% de filer)

% CAP	Dap	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (N)	Fluência (mm)
4,0	2,456	7,839	17,5	55,3	11800	2,2
4,5	2,444	7,464	18,3	59,3	10525	2,3
5,0	2,448	6,509	18,6	65,0	10875	2,7
5,5	2,464	5,194	18,6	72,0	10057	2,2
6,0	2,494	3,406	18,2	81,3	10585	2,9

Figura 7.10. Dosagem Marshall – Densidade aparente *versus* teor de asfalto (3,5% de filer) Figura 7.11. Dosagem Marshall – Volume de vazios *versus* teor de asfalto (3,5% de filer)

Figura 7.12. Dosagem Marshall – Vazios do agregado mineral *versus* teor de asfalto (3,5% de filer)

Figura 7.13. Dosagem Marshall – Relação betume-vazios *versus* teor de asfalto (3,5% de filer)

Figura 7.14. Dosagem Marshall – Estabilidade *versus* teor de asfalto (3,5% de filer)

Figura 7.15. Dosagem Marshall – Fluência *versus* teor de asfalto (3,5% de filler)

Foi realizada a dosagem Marshall com os corpos-de-prova contendo 6,0% de filler e os resultados das médias dos parâmetros estão apresentados na Tabela 7.8 e Figura 7.16 a 7.21.

O teor ótimo de ligante asfáltico é de 5,0%.

Tabela 7.8 - Dosagem Marshall (6,0% de filler)

% CAP	Dap	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (N)	Fluência (mm)
4,0	2,462	7,427	17,2	56,7	12155	2,5
4,5	2,478	6,014	17,0	64,8	13075	2,8
5,0	2,513	4,013	16,4	75,6	13050	3,3
5,5	2,521	3,013	16,7	82,0	13300	2,5
6,0	2,525	2,330	17,3	86,5	10925	2,7

Figura 7.16. Dosagem Marshall – Densidade aparente *versus* teor de asfalto (6,0% de filler)

Figura 7.17. Dosagem Marshall – Volume de vazios *versus* teor de asfalto (6,0% de filler)

Figura 7.18. Dosagem Marshall – Vazios do agregado mineral *versus* teor de asfalto (6,0% de filler)

Figura 7.19. Dosagem Marshall – Relação betume-vazios *versus* teor de asfalto (6,0% de filer)

Figura 7.20. Dosagem Marshall – Estabilidade *versus* teor de asfalto (6,0% de filer)

Figura 7.21. Dosagem Marshall – Fluência *versus* teor de asfalto (6,0% de filer)

7.5 ENSAIOS EXPLORATÓRIOS

O objetivo deste trabalho, como já citado, é testar a hipótese de que a utilização de cinzas da queima da casca de *Pinus* como agregado fino não compromete o comportamento de misturas asfálticas. Para tanto, desenvolveu-se um programa de ensaios com o propósito de avaliar, primeiramente, o comportamento das propriedades volumétricas dos corpos-de-prova contendo o resíduo-cinzas.

A dificuldade está na seleção do valor da massa específica do resíduo que deve ser empregada para que valores realísticos sejam alcançados, uma vez que a massa específica determinada pela picnometria de gás hélio foi bem superior à aparente, cuja determinação não foi possível com a utilização de fluidos usuais: água, querosene e álcool.

A massa específica real inclui apenas o volume das partículas dos agregados e não o volume de nenhum poro ou capilar que pode ser preenchido com água. Enquanto a massa específica aparente inclui todo o volume das partículas dos agregados, assim como o volume dos poros que pode ser preenchido com água. O volume de sólidos de um agregado, nas determinações usuais para caracterização visando utilização em pavimentação asfáltica, contém os poros internos que são impermeáveis tanto à água quanto ao asfalto, o que, na picnometria de gás hélio, não ocorre, pois seus átomos são tão pequenos que alcançam esses vazios internos do material (no nosso caso, o resíduo) e, assim, permitem que o volume de sólidos não inclua os poros internos, resultando em maiores valores de massa específica.

Admitindo-se que o ligante asfáltico não consegue acessar os vazios internos do resíduo (que fazem a massa específica aparente ser tão mais baixa do que a massa específica real obtida no

ensaio de picnometria de gás hélio), foi considerada, neste trabalho, a massa específica aparente, pois o asfalto não consegue acessar os vazios internos, que seria análogo aos poros dentro dos agregados, não considerados quando se determina a massa específica real dos agregados.

Foi considerado, também, que o fíler faz parte de um mástique, formado juntamente com o ligante asfáltico, ou seja, o resíduo é formado por partículas tão finas que são incorporadas à película de ligante asfáltico que envolve as partículas maiores.

Inicialmente, foram feitas misturas com o resíduo, substituído em massa pela curva granulométrica determinada para o fíler mineral, ou seja, empregando-se o valor de massa específica real do resíduo. Foram compostos corpos-de-prova com teor ótimo de ligante obtido para as misturas com o fíler mineral (misturas de controle) e também com porcentagem maiores de ligante asfáltico, devido a granulometria do resíduo ser mais fina. As Tabelas 7.9 e 7.10 mostram os resultados das misturas para 3,5 e 6,0% de resíduo-cinzas.

Tabela 7.9 - Propriedades volumétricas dos corpos-de-prova contendo 3,5% de resíduo (em massa)

% CAP	Dap	DMT	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
5,85	2,316	2,474	6,886	19,519	67,442
6,5	2,332	2,500	6,696	21,662	69,088

Tabela 7.10 - Propriedades volumétricas dos corpos-de-prova contendo 6,0% de resíduo (em massa)

% CAP	Dap	DMT	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
5,0	2,193	2,518	12,928	23,751	45,590
7,0	2,261	2,435	7,152	22,774	68,598

Nota-se que o volume de vazios manteve-se muito alto, mesmo aumentando-se muito o teor de ligante asfáltico, e que os corpos-de-prova compostos pelo resíduo apresentam um volume maior, como pode ser verificado na Tabela 7.11.

Tabela 7.11 - Volume dos corpos-de-prova contendo diferentes tipos de filer

Tipo Fíler	% Fíler	%CAP	Volume (cm ³)
Mineral	3,5	5,85	479
	6,0	5,0	470
Resíduo	3,5	5,85	510,8
	6,0	5,0	540,6

Com a indicação de que a consideração da massa específica real do resíduo não estava adequada, o que também pôde ser verificado quando, calculando-se a massa específica do resíduo através dos valores de Densidade Máxima Teórica (Equação 6.17), foi obtido valor em torno de 0,8. Foi feita a substituição do filer mineral pelo resíduo em volume, ou seja, considerando-se o valor da massa específica aparente, admitindo-se relação de massas específicas de 1:3 (fíler mineral: cinzas). As Tabelas 7.12 e 7.13 mostram os resultados dos parâmetros volumétricos das misturas com substituição do filer mineral pelo resíduo em volume.

Tabela 7.12 - Propriedades volumétricas dos corpos-de-prova contendo 3,5% de resíduo (em volume)

% CAP	Dap	DMT	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
6,0	2,453	2,576	4,779	19,308	75,251
7,0	2,475	2,514	1,569	18,670	91,597

Tabela 7.13 - Propriedades volumétricas dos corpos-de-prova contendo 6,0% de resíduo (em volume)

% CAP	Dap	DMT	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
5,0	2,387	2,589	7,823	19,604	60,096
6,0	2,424	2,544	4,733	19,090	75,220
6,5	2,423	2,516	3,688	19,236	80,829

Foram obtidos os teores ótimos de ligante asfáltico de 6,2 e 6,3% de ligante, respectivamente, para a quantidade de resíduo de 3,5 e 6,0%, correspondentes a um volume de vazios de 4,0%.

7.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Na Tabela 7.14 estão apresentados os valores médios, referentes a três determinações, e os desvios padrão da resistência à tração por compressão diametral. Na Figura 7.22 pode-se visualizar a variação dos valores de resistência à tração, para diferentes quantidades e tipos de filer – mineral e resíduo.

Tabela 7.14 – Valores médios de resistência à tração

Quantidade de Filer (%)	Resistência à Tração (MPa)			
	Filer Mineral		Resíduo	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
3,5	1,744	0,02	1,454	0,06
6,0	1,575	0,04	1,477	0,10

Figura 7.22. Variação da resistência tração em função da quantidade e do tipo de filer

Pode-se perceber que as misturas contendo uma quantidade menor de fíler mineral apresentam valores de resistência à tração superiores, de aproximadamente 10%. Em relação ao tipo de fíler os resultados dos ensaios com o fíler mineral foram maiores – cerca de 20% e 7%, para 3,5 e 6,0% de fíler respectivamente, quando comparados às misturas com o resíduo, indicando uma maior diferença quando é menor o teor de material passado na peneira nº 200.

7.7 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os dados apresentados na Tabela 7.15 referem-se à média dos valores, referentes a determinação em todos os corpo-de-prova da pesquisa - exceto àquele submetidos ao condicionamento do ensaio de umidade induzida - e os desvios padrão de módulo de resiliência. A Figura 7.23 ilustra a variação do módulo de resiliência em função da quantidade e tipo de fíler.

Tabela 7.15 – Valores médios de módulo de resiliência

Quantidade de Fíler (%)	Módulo de Resiliência (MPa)			
	Fíler Mineral		Resíduo	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
3,5	7273	94,20	6280	63,55
6,0	8022	79,61	6815	38,29

Figura 7.23. Variação do módulo de resiliência em função da quantidade e tipo de filler

Para quantidades maiores de fileres (6,0%) os valores de módulo de resiliência são superiores, de 10 e 8% para filler mineral e o resíduo, respectivamente. Quanto ao tipo de filler, os resultados para o resíduo foram, aproximadamente, 15% menores quando comparados com os do filler mineral.

7.8 RELAÇÃO MR/RT

A relação MR/RT permite inferir o comportamento das misturas asfálticas em relação ao trincamento, tendo sido utilizada como um indicador da flexibilidade com a capacidade de suporte das misturas; quando se tem valores baixos dessa relação pode haver uma melhora no comportamento mecânico das misturas, pois pode indicar maior flexibilidade unida a uma boa resistência à tração. Porém, o ideal é a realização de análise mecanística com a execução dos ensaios de módulo de resiliência e de vida de fadiga para estimar o comportamento da mistura em estruturas de pavimentos.

A Tabela 7.16 apresenta os resultados da relação MR/RT para as diferentes quantidades e tipos de fíler, e a Figura 7.24 compara graficamente essas relações.

Tabela 7.16 – Relação MR/RT em função da quantidade e do tipo de fíler

Quantidade de Fíler (%)	Relação MR/RT	
	Fíler Mineral	Resíduo
3,5	4170	4318
6,0	5092	4614

Figura 7.24. Relação MR/RT em função da quantidade e do tipo de fíler

As misturas contendo fíler mineral se mostraram mais sensíveis à quantidade desse material na mistura, aumentando a relação MR/RT em 22% com o aumento do teor de fíler. Para uma quantidade de fíler de 6,0%, os valores para misturas com fíler mineral foram cerca de 10% maiores que as das com resíduo.

7.9 VIDA DE FADIGA

Os resultados dos ensaios de fadiga estão apresentados nas Tabelas 7.17 a 7.20. O ensaio realizado foi o de tensão controlada, com valores de carga aplicados de 10, 20, 30 e 40% da

resistência à tração. Com as curvas dos ensaios de fadiga, ilustrados nas Figuras de 7.25 a 7.32, foram calibrados os modelos de fadiga, tanto em função da diferença de tensões como para a deformação resiliente.

Tabela 7.17– Resultados dos ensaios de fadiga para os corpos-de-prova contendo 3,5% de filer mineral

RT considerada = 1,744 MPa							
Nº CP	MR (MPa)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	Carga (N)	$\Delta\sigma$ (MPa)	N	ϵ_r
63	7037	0,159	9,11	1502,81	0,6352	22502	2,26E-05
64	6743	0,159	9,10	1503,26	0,6352	15654	2,35E-05
65	7192	0,319	18,32	3004,74	1,2779	3143	4,44E-05
78	5118	0,318	18,21	3007,43	1,2703	1146	6,21E-05
79	6377	0,485	27,80	4521,19	1,9391	423	7,60E-05
80	6894	0,476	27,30	4502,33	1,9041	395	6,91E-05
81	10597	0,628	35,99	5991,80	2,5109	210	5,92E-05
82	7023	0,642	36,83	6003,29	2,5694	213	9,15E-05
Modelos de Fadiga					Função da diferença de tensões		
					$N = 4087,1 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{3,2957}$		
					Função da deformação resiliente		
					$N = 4 \times 10^{-12} \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{3,3798}$

Figura 7.25. Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova contendo 3,5% de filer mineral

Figura 7.26. Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova contendo 3,5% de filer mineral

Tabela 7.18 – Resultados dos ensaios de fadiga para os corpos-de-prova contendo 6,0% de filer mineral

RT considerada = 1,575 MPa							
Nº CP	MR (MPa)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	Carga (N)	$\Delta\sigma$ (MPa)	N	ϵ_r
51	7510	0,158	10,06	1503,25	0,6337	32162	2,11E-05
52	9586	0,160	10,18	1504,94	0,6415	42669	1,67E-05
53	8748	0,319	20,22	3006,47	1,2745	3942	3,64E-05
66	6942	0,317	20,11	3004,85	1,2670	2512	4,56E-05
67	6142	0,475	30,14	4509,97	1,8992	596	7,73E-05
68	8417	0,484	30,69	4505,74	1,9343	475	5,75E-05
69	7605	0,629	39,93	5987,59	2,5162	341	8,27E-05
70	8297	0,608	38,60	5987,53	2,4327	399	7,33E-05
Modelos de Fadiga	Função da diferença de tensões				$N = 7139 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{3,527}$		
	Função da deformação resiliente				$N = 3 \times 10^{-11} \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{3,1729}$

Figura 7.27. Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova contendo 6,0% de fíler mineral

Figura 7.28. Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova contendo 6,0% de fíler mineral

Tabela 7.19– Resultados dos ensaios de fadiga para os corpos-de-prova contendo 3,5% de resíduo

RT considerada = 1,454 MPa							
Nº CP	MR (MPa)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	Carga (N)	$\Delta\sigma$ (MPa)	N	ϵ_r
91	5801	0,148	10,15	1402,85	0,5903	11483	2,54E-05
92	6381	0,148	10,19	1403,33	0,5929	11168	2,32E-05
93	5852	0,295	20,26	2802,51	1,1785	1429	5,03E-05
94	6428	0,297	20,44	2807,44	1,1892	2091	4,62E-05
95	6100	0,443	30,47	4196,82	1,7727	582	7,26E-05
96	7516	0,438	30,12	4201,08	1,7521	735	5,83E-05
97	6319	0,595	40,93	5596,02	2,3808	377	9,42E-05
98	6144	0,590	40,60	5581,27	2,3618	245	9,61E-05
Modelos de Fadiga		Função da diferença de tensões		$N = 2814,3 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,5928}$			
		Função da deformação resiliente		$N = 5 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{2,6723}$

Figura 7.29. Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova contendo 3,5% de resíduo

Figura 7.30. Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova contendo 3,5% de resíduo

Tabela 7.20 – Resultados dos ensaios de fadiga para os corpos-de-prova contendo 6,0% de resíduo

RT considerada = 1,477 MPa							
Nº CP	MR (MPa)	Tensão aplicada (MPa)	%RT	Carga (N)	$\Delta\sigma$ (MPa)	N	ϵ_r
106	7162	0,148	10,04	1403,86	0,5929	11915	2,07E-05
107	7148	0,148	9,99	1403,72	0,5904	8206	2,07E-05
108	6255	0,292	19,79	2806,21	1,1694	1677	4,67E-05
109	6585	0,299	20,24	2805,85	1,1958	1896	4,54E-05
110	6715	0,440	29,80	4207,86	1,7603	477	6,55E-05
111	6493	0,444	30,04	4204,53	1,7745	412	6,83E-05
112	5913	0,588	39,82	5590,63	2,3526	162	9,95E-05
113	7780	0,592	40,10	5597,54	2,3691	231	7,61E-05
Modelos de Fadiga	Função da diferença de tensões				$N = 2374,4 \times \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{2,8568}$		
	Função da deformação resiliente				$N = 2 \times 10^{-9} \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{2,7021}$

Figura 7.31. Número de ciclos em função da diferença de tensões em corpos-de-prova contendo 6,0% de resíduo

Figura 7.32. Número de ciclos em função da deformação resiliente em corpos-de-prova contendo 6,0% de resíduo

Figura 7.33. Número de ciclos em função da diferença de tensões para corpos-de-prova contendo diferentes quantidades e tipos de filer

As Figuras 7.33 e 7.34 mostram a variação do comportamento das curvas de fadiga de corpos-de-prova contendo diferentes quantidades e tipos de filer. Pode-se perceber na Figura 7.33 que, quando o mesmo tipo de filer é utilizado, a inclinação das retas se mantém, apenas transladando quando se muda a quantidade de filer. Porém quando comparados os diferentes tipos de fileres há uma mudança na inclinação. A Figura 7.34 não apresenta nenhuma tendência para as diferentes quantidades e tipos de filer.

Figura 7.34. Número de ciclos em função da deformação resiliente para corpos-de-prova contendo diferentes quantidades e tipos de fíler

7.10 DANO POR UMIDADE INDUZIDA

Os resultados dos ensaios para avaliação do dano por umidade induzida, quanto a resistência à tração, estão na Tabela 7.21. Na Figura 7.35 pode-se visualizar o comportamento das misturas quanto à susceptibilidade térmica e à água, em que o valor mínimo de resistência à tração retida deve ser de 80%, de acordo com a AASHTO T-283, que foi a norma seguida para o condicionamento dos corpos-de-prova, com volume de vazios destes de 4,0%, existindo outros ensaios, como do NCHRP 246 e ASTM D 4867, em que o procedimento de condicionamento e critério de aceitação são diferentes, este último sendo de 70%.

Tabela 7.21 – Resultados dos ensaios de dano por umidade induzida – resistência à tração

Quantidade de Fíler (%)	RT (MPa)		RTC (MPa)		RTR (%)	
	Fíler Mineral	Resíduo	Fíler Mineral	Resíduo	Fíler Mineral	Resíduo
3,5	1,744	1,454	1,301	0,969	74,6	66,6
6,0	1,575	1,477	1,389	0,860	88,1	58,2

Figura 7.35. Valores de resistência a tração retida (RTR) das misturas

Apenas as misturas contendo 6,0% de fíler mineral exibiram valores de RTR maiores de 80%, portanto, não são sensíveis aos danos por umidade induzida. As misturas contendo o resíduo apresentaram valores de RTR muito menores que os com fíler mineral, sendo muito mais susceptíveis aos danos por umidade induzida.

Os resultados dos ensaios de sensibilidade à umidade, quanto ao módulo de resiliência, estão na Tabela 7.22, e na Figura 7.36 pode-se visualizar o comportamento das misturas, destacando-se que não há uma norma para esse tipo de ensaio, fazendo-se de foram similar à análise da resistência à tração, limitando o valor de módulo de resiliência retido em 80%.

Tabela 7.22 – Resultados dos ensaios de dano por umidade induzida – módulo de resiliência

Quantidade de Fíler (%)	MR (MPa)		MRC (MPa)		MRR (%)	
	Fíler Mineral	Resíduo	Fíler Mineral	Resíduo	Fíler Mineral	Resíduo
3,5	7845	7119	6176	4487	78,73	62,96
6,0	8418	6840	7149	4208	84,92	61,52

Figura 7.36. Valores de módulo de resiliência retida (MRR) das misturas

Analogamente aos resultados de RTR, apenas misturas contendo 6,0% de filer mineral apresentaram valores de MRR maiores que 80%, sendo não susceptíveis aos danos por umidade induzida. As misturas contendo o resíduo apresentaram comportamento inferior ao das misturas com filer mineral.

7.11 ANÁLISE MECANÍSTICA

Para a avaliação do comportamento das misturas em relação à vida de fadiga foi realizada uma análise mecanística, que permite que o módulo de resiliência seja considerado, pois está diretamente relacionado às respostas estruturais.

Para isso, foram elaboradas duas estruturas de pavimentos hipotéticas e, com o auxílio do programa computacional ELSYM5 (*Elastic Layered System 5*), determinadas as diferenças de tensões na fibra inferior da camada do revestimento asfáltico. As características das camadas das duas estruturas estão descritas na Tabela 7.23.

Tabela 7.23 – Características das camadas das duas estruturas utilizadas na análise mecânica

ESTRUTURA 1			
	Espessura (cm)	Coefficiente Poisson	Módulo de Resiliência (kgf/cm²)
CAPA	15	0,35	variável
BASE	25	0,4	3500
SUB BASE	30	0,4	2000
SUB LEITO	semi-infinito	0,45	500
ESTRUTURA 2			
	Espessura (cm)	Coefficiente Poisson	Módulo de Resiliência (kgf/cm²)
CAPA	10	0,35	variável
BASE	15	0,4	3000
SUB BASE	20	0,4	1500
SUB LEITO	semi-infinito	0,45	350

Quanto ao carregamento, foram simuladas rodas duplas, com pressão de enchimento de pneus de 5,6 kgf/cm², com carregamento de 8200kgf, separados a uma distância de 28,8 cm. A Figura 7.37 esquematiza a estrutura e o carregamento, assim como os pontos de análise das tensões sob o carregamento e entre as rodas.

Figura 7.37. Esquema da estrutura e carregamentos da simulação para análise estrutural mecânica

Para a avaliação estrutural, utilizou-se o modelo correspondente de cada material, segundo a Equação 7, e assim determinado o número de ciclos correspondente à vida de fadiga do material com as diferenças de tensões calculados pelos dados gerados pelo programa computacional ELSYM5. O ponto mais crítico é o A – sob o carregamento, e a vida de fadiga das diferentes misturas estão apresentados nas Tabelas 7.24 e 7.25 e nas Figuras 7.38 e 7.39 tem-se a comparação gráfica dos dados.

$$N = k_1 \times \left(\frac{1}{\Delta \sigma} \right)^{k_2} \quad (7)$$

Para a estrutura mais rígida, a substituição do fíler mineral pelo resíduo reduziu a vida de fadiga em 20% para uma quantidade de fíler de 3,5% e de 60% para 6,0% de fíler. Na estrutura mais esbelta, a substituição de fíler mineral por resíduo melhorou a vida de fadiga, aumentando o número de ciclos em 25%, enquanto que para uma quantidade de fíler de 6,0% diminuiu em 32%.

Tabela 7.24 – Vida de fadiga das diferentes misturas para a estrutura 1

Mistura	$\Delta\sigma$ (MPa)	k_1	k_2	N
3,5% resíduo	0,8023	2814,30	2,593	4982
6,0% resíduo	0,8441	2374,40	2,857	3853
3,5% fíler mineral	0,8770	4087,10	3,296	6299
6,0% fíler mineral	0,9303	7139,00	3,527	9211

Tabela 7.25 – Vida de fadiga das diferentes misturas para a estrutura 2

Mistura	$\Delta\sigma$ (MPa)	k_1	k_2	N
3,5% resíduo	1,8340	2814,30	2,593	584
6,0% resíduo	1,9090	2374,40	2,857	374
3,5% fíler mineral	1,9719	4087,10	3,296	436
6,0% fíler mineral	2,0668	7139,00	3,527	552

Figura 7.38. Vida de fadiga das diferentes misturas para a estrutura 1

Figura 7.39. Vida de fadiga das diferentes misturas para a estrutura 2

7.12 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL

Na Tabela 7.26 estão apresentados os valores médios, referentes a três determinações, e os desvios padrão de Estabilidade Marshall. Na Figura 7.40 pode-se visualizar a variação dos valores de Estabilidade Marshall com diferentes quantidades e tipos de fíler – mineral e o resíduo.

Pode-se perceber que as misturas contendo 6,0% de fíler mineral apresentaram os maiores valores de estabilidade e as misturas com resíduo apresentaram resultados praticamente iguais para diferentes quantidades do material.

Tabela 7.26 – Valores médios de estabilidade Marshall

Quantidade de Fíler (%)	Estabilidade (N)			
	Fíler Mineral		Resíduo	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
3,5	10430	235	8590	121,9
6,0	13050	219	8650	71,6

Figura 7.40. Variação da estabilidade em função da quantidade e tipo de fíler

Os dados apresentados na Tabela 7.27 referem-se à média dos valores de Fluência e os desvios padrão. A Figura 7.41 ilustra a variação da Fluência em função da quantidade e tipo de fíler.

Tabela 7.27 – Valores médios de fluência Marshall

Quantidade de Fíler (%)	Fluência (mm)			
	Fíler Mineral		Resíduo	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
3,5	2,69	0,218	2,34	0,25
6,0	3,33	0,055	2,47	0,281

Figura 7.41. Variação da fluência em função da quantidade e tipo de filer

Assim como os resultados dos ensaios de Estabilidade Marshall, as misturas contendo 6,0% de filer mineral apresentaram os maiores valores de fluência e as misturas com resíduo apresentaram resultados praticamente iguais para diferentes quantidades do material.

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo geral desta pesquisa foi testar a hipótese de que a utilização de cinzas da queima da casca de *Pinus* como agregado fino não compromete o comportamento de misturas asfálticas, sendo tal verificação mediante ensaios de laboratório que avaliam propriedades de engenharia.

Para a avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas foram efetuados os ensaios de dosagem pelo Método Marshall e moldagem de corpos-de-prova com diferentes quantidades - 3,5 e 6,0% - e tipos de filer - mineral e cinzas (resíduo). Para a análise do comportamento das misturas asfálticas foram realizados os seguintes ensaios:

- Marshall (Estabilidade e Fluência);
- Resistência à Tração;
- Módulo de Resiliência;
- Vida de Fadiga
- Dano por Umidade Induzida

8.1 CONCLUSÕES

Quanto à dosagem Marshall, o teor ótimo de ligante para as misturas contendo cinzas – resíduo - foi maior (6,25%) que para o filer mineral, podendo-se considerar o mesmo teor para

diferentes quantidades de filler. Já para o filler mineral, as misturas com teor de 3,5% de filler tiveram teores ótimos de ligante maiores (5,85%) que as misturas com 6,0% de filler (5,0%). Os ensaios de Estabilidade e Fluência Marshall mostraram que as misturas contendo 6,0% de filler mineral apresentaram os maiores valores, tanto de estabilidade quanto de fluência, e que os resultados para as misturas com resíduo não foram alteradas pelo teor de filler.

Nos ensaios de resistência à tração, os maiores valores foram verificados para as misturas contendo 3,5% de filler mineral (1,744 MPa), enquanto as misturas contendo cinzas – resíduo – apresentaram os menores valores (1,5 MPa), para diferentes quantidades de material. Em relação aos valores obtidos para a resistência à tração, esperava-se que quanto menor o tamanho das partículas do filler na mistura, maior fosse a resistência à tração estática da mesma, pois partículas pequenas tendem a unir-se com o ligante, tornando a mistura mais rígida, o que não ocorreu. Esperava-se, também, que com o aumento do teor de filler nas misturas asfálticas, os valores de resistência à tração também aumentassem, pois este fato indica que as partículas dos fillers unem-se ao ligante, aumentando a sua consistência e, conseqüentemente, a rigidez e a resistência da mistura, tendo ocorrido o contrário para o filler mineral.

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência mostram que as misturas contendo 6,0% de filler mineral tiveram os maiores valores (8000 MPa) e que para misturas contendo as cinzas – resíduo - os maiores valores de módulo de resiliência também foram das que continham maior quantidade de resíduo.

Na relação MR/RT, os maiores valores foram para as misturas contendo 6,0% de filer – tanto para filer mineral quanto para o resíduo, ainda que para o filer mineral essa relação tenha sido maior.

Na avaliação do dano por umidade induzida, apenas as misturas contendo 6,0% de filer mineral se mostraram não susceptíveis, tanto se considerarmos a avaliação da resistência à tração quanto o módulo de resiliência. As misturas contendo as cinzas – resíduo – mostraram-se sensíveis aos danos por umidade induzida, com valores de RTR e MRR baixos – em torno de 60%.

Quanto à avaliação do comportamento das misturas em relação à vida de fadiga, realizada através da análise mecanística, a mistura contendo o resíduo que apresentou melhor desempenho foi com 3,5%, para pavimentos mais esbeltos. Para quantidades maiores de filer e para pavimento rígido, o resíduo diminuiu a vida de fadiga.

Para todos os ensaios realizados, o comportamento das misturas contendo o resíduo foi inferior ao das misturas com filer mineral. Porém, os valores de resistência à tração e módulo de resiliência mantiveram-se acima dos recomendados por norma, apenas no ensaio de dano por umidade induzida as misturas com resíduo apresentaram resultados abaixo daqueles recomendados. As cinzas – resíduo podem ser utilizadas como agregado fino em misturas asfálticas densas, pois não compromete o seu comportamento, apesar de haver, em alguns casos, perda de propriedades mecânicas, mas não inviabilizam sua utilização.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para a continuidade da pesquisa com o resíduo da queima da casca de *Pinus* são:

- Avaliar misturas compostas com o resíduo e outro tipo de filer, como o mineral utilizado nesta pesquisa ou com cimento ou cal, e em diferentes proporções desses materiais;
- Caracterizar as misturas contendo o resíduo quanto à deformação permanente, através de ensaio de fluência por compressão uniaxial estática ou dinâmica, por exemplo;
- Caracterizar o comportamento do mástique composto pelo ligante e o resíduo, avaliando suas propriedades fundamentais, como por exemplo, através de ensaios da especificação Superpave: *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), *Bending Beam Rheometer* (BBR), *Direct Tension Tester* (DTT);
- Caracterização das propriedades físicas e químicas das cinzas-resíduo, através, por exemplo, de granulometria a laser, microscopia de Varredura Eletrônica etc;
- Avaliar o potencial de poluição das cinzas - resíduo quando incorporado à mistura asfáltica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (1991). *Handbook of hot-mix asphalt paving*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO PP2 (2001). *Standard practice for mixture conditioning of hot mix asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO T-19/T 19M (1997). *Unit weight and voids in aggregate*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO T283 (1999) *Standard Practice for Resistance of Bituminous Mixture to Moisture Induce Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABNT NBR 12891 (1993). *Dosagem de misturas betuminosas pelo Método Marshall*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 10004 (2004). *Resíduos Sólidos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1993.

ASPHALT INSTITUTE (1995). *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types*.

ASTM C 127 (2004). *Standard test method for density, relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia.

ASTM C 128 (2004). *Standard test method for density, relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia.

ASTM D 2493. (2004). *Standard viscosity-Temperature Chart for Asphalt*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia.

BARKSDALE, R. D.; ASBA, J.; KHOSLA, N. P.; KIM, R.; RAHMAN, M. S. (1997). *Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design*. In: Project 1-28, Final Report, Georgia Tech Project E20-634, EUA.

BERNADUCE, C. (1998). *Fabricação de Painéis de Média Densidade (MDF) a partir de fibras de Eucalyptus grandis W. Hill Ex Maiden e Pinus caribaea Morelet var. hondurensis Barret e Golfari*. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

BORASCHI, P., GRASSI, L., BRACCINI, G., GIGONI, R., CARTEI, F., PERRI, G. (1996). *Occult Post-traumatic Osteochondral Changes in the Knee. Assessment with magnetic resonance*. Radiol Med. 91, 558-562.

BRANCO, V.T.F.C. (2004). *Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado*. Dissertação (Mestrado). COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BROWN, E. R.; KANDHAL, P.S.; ZHANG, J. (2001). *Performance testing for hot mix asphalt*. National Center for Asphalt Technology. Auburn University. 79p. Auburn.

CAMPOS, C. I.; LAHR, F.A.R. (2004). *Estudo Comparativo dos Resultados de Ensaio de Tração para MDF Produzidos em Laboratório com Fibras de Pinus e de Eucalipto Utilizando Uréia-Formaldeído*. Revista Matéria ISSN 1517-7076. v. 9, pp. 32-42.

CASTRO, E. M. (2000). *Processo de produção mecânica de MDF*. Dissertação de Mestrado. Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos.

CHOW, P. (1976). *Properties of Medium-Density, Dry-Formed Fiberboard from Sevem Hardwood Residues and Bark*. Forest Products Journal, v.26, n.5, p.48-55.

COELHO, V. (1996). *Contribuição ao estudo das deformações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 281p. São Carlos.

COMINSKY, R.J; KILLINGSWORTH, B.M; ANDERSON, R.M; ANDERSON, D.A; CROCKFORD, W.W. (1998). *Quality control and acceptance of SUPERPAVE – designed hot mix asphalt*. National Cooperative Highway Research Program, report 409, p 1-26.

CRAUS, J.; ISHIAI I.; SIDES A. (1978). *Guidelines for use of dust in hot-mix asphalt concrete mixtures*. Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists. v. 56, pp. 492-516.

CROSS, S.A.; BROWN, E.R. (1992). *Selection of aggregate properties to minimize rutting of heavy duty pavements*. Menninger, R.C., editor, *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

CUNHA, M.B. (2004). *Avaliação do Método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 105p. São Carlos.

DNER-EM 367/97 (1997). *Material de Enchimento para Misturas Betuminosas*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER ES 313/97 (1997) *Pavimentação – Concreto Betuminoso*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Especificação de Serviço, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 16p.

DNER-ME 117/87 (1987). *Misturas betuminosas – determinação da densidade aparente*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER-ME 085/94 (1994) *Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER-ME 133/94 (1994b). *Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER-ME 138/94 (1994a). *Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DNER-ME 081/98 (1998a). *Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado miúdo*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.

DIX, B.; MARUTZKY, R. (1997). *Use of Wood from Short-Rotation Plantations*. Holz Zentralblatt, v.123, n.9, p.141-142.

ELEOTÉRIO, J.R. (2000). *Propriedades Físicas e Mecânicas de Painéis MDF de diferentes Densidades e Teores de Resina*. Dissertação (Mestrado) – Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 121p. Piracicaba.

FAO (1958). *Fiberboard and Particleboard*. Rome: FAO, 73p.

FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987). *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. Madison, WI: USDA, forest Service, Forest Products Laboratory, 463p. (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113).

FURLAN, A.P.; GOUVEIA, L.T.; FABBRI, G.T.P.; FERNANDES JR., J.L. (2004) *Influência de características dos agregados na susceptibilidade a dano por umidade de misturas asfálticas*. 17°C Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro. Pp. 198 – 206.

GOUVEIA, L.T. (2002). *Avaliação do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) da especificação superpave*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 165p. São Carlos.

GRIGORIOU, A. (1983). *Comparison Between Medium Density Fiberboard and Particleboard*. Holz als Roh und Werkstoff, v.41, n.5, p.183-186.

HARRIS, B.M., STUART, K.D. (1995). *Analysis of Mineral Fillers and Mastic Used in Stone Matrix Asphalt*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT, v. 64, p. 54-95, Portland, Oregon, EUA.

HUBER, G.A.; JONES, J.C.; MESSERSMITH, P.E.; JACKSON, M. (1998) *Contribution of Fine Aggregate Angularity and Particle Shape to Superpave Mixture Performance*. Transportation Research Record, n. 16099, pp. 28-35.

ILDEFONSO, J.S. (2007). *Análise de Viabilidade Técnica da Utilização do copolímero Etileno Acetato de Vinila (EVA) Descartado pela Indústria Calçadista em Misturas Asfálticas (Processo Seco)*. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 330p. São Carlos.

JENSEN, U.; KEHR, E. (1995). *Dimensional Stability of MDF and Particleboards*. Holz als Roh und Wekstoff, v.53, n.6, p.369-376.

KANDHAL, P.S.; FOO, K.Y.; MALLICK, R.B. (1998). *Critical review of voids in mineral aggregate requirements in SUPERPAVE*. Transportation Research Record, n. 1609, p21-27.

KANDHAL, P.S.; COOLEY Jr., L.A. (2002). *The Restricted Zone in the Superpave Aggregate Gradation Specification*. NCHRP Report 464 from National Cooperative Highway Research Program. National Academy Press, Washington D.C.

KANDHAL, P.S.; COOLEY Jr., L.A. (2002). *Investigation of the Restricted Zone in the Superpave Aggregate Gradation Specification*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v.71, p. 479-510.

KAVUSSI, A.; HICKS, R.G. (1997) *Properties of bituminous mixtures containing different fillers*. Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists.

KOCH, P. (1992). *Wood versus Nonwood Materials in U.S. Residential Construction: Some Energy-Related Global Implications*. Forest Products Journal, v.42, n.5, p.31-42.

LEITE, L.F.M; MOTTA, L.M.G. (2002). *O efeito do filer nas características do ligante asfáltico*. Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – 16º ANPET, v.01, p.183-194, Natal-RN, Brasil.

MALONEY, T.M. (1989). *Modern Particleboard & Dry-Process Fiberboard Manufacturing*. San Francisco: Miller Freeman. 672p.

MALONEY, T.M. (1996). *The Family of Wood composite Materials*. Forest Products Journal, v.46, n.2, p.19-26.

McGENNIS, R.B.; ANDERSON, T.M.; KENNEDY, T.W.; SOLAIMANIAN, M. (1994). *Background of Superpave asphalt mixture design and analysis*. Asphalt Institute Report FHWA-SA-95-003.

MEDINA, J. (1997). *Mecânica dos Pavimentos*. 380p. COPPE/UFRJ, Editora UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

MEDINA, J.; MOTTTA, L.M.G. (2005). *Mecânica dos pavimentos*. 2ª ed. 574p. Rio de Janeiro, UFRJ.

MOGAWER, W.S.; STUART, K.D. (1996). *Effects of Mineral Fillers on Properties of Stone Matrix Asphalt Mixtures*. Transportation Research Record – TRR 1530. p.86-94. Washington, D.C., EUA.

MOURÃO, F.A.L. (2003). *Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA*. Dissertação (Mestrado). COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MOTTA, L.M.G.; PINTO, S. (1994). *O uso de ensaios estáticos na definição de parâmetros de comportamento das misturas asfálticas*. 12ª Encontro de Asfalto, p.152-178.

MOTTA, L.M.G.; LEITE, F.L.M.; CONSTANTINO, R.S.; TONIAL, I.A. (1996). *Curso sobre o programa SHRP: Aplicação a ligantes, agregados e misturas betuminosas*. Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro.

MOTTA, L.M.G., LEITE, L.F.M. (2000). *Efeito do Fíler nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas*. Anais do 11º congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte, pp. 1007-1017, Gramado-RS, 19-23 Novembro.

NBR 12891 (1993). *Dosagem de Misturas Betuminosas Pelo método Marshall*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

NIEMZ, P.; POBLETE, H. (1996). *Investigations on the Dimensional stability of MDF and Particleboards*. Holz als Roh und Werkstoff, v.54, n.2, p.141-144.

PINHEIRO, J. H. M.; SOARES, J. B. & LEITE, L.F.M. (2003) *Caracterização de misturas asfálticas com borracha produzidas pelos processo úmido e seco*. XVII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Anais, vol 1. Rio de Janeiro. Pp. 116 – 129.

PINILLA, A. (1965) *O sistema filer-betume, algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas*. Conselho Nacional de Pesquisas. Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

PINTO, S. (1991). *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. Tese (Doutorado). COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

QUEIROZ, C. A. V.; VISSER, A. T. (1978). *Uma Investigação dos Módulos de Resiliência de Revestimentos Betuminosos Brasileiros*. 4ºRAPv, ABPv, João Pessoa.

REED, B. J. H. (1996). *Electron microscopy analysis and scanning electron microscopy in geology*. New York, Cambridge University Press.

ROBERT, F.L., KANDHAL, P.S., BROWN, E.R. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*, Seond Edition, NAPA Educational Foundation Ianham, Maryland.

SANTANA, H. (1995). *Considerações sobre os Nebulosos Conceitos e definições de Fíler em Misturas Asfálticas*. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá. Associação Brasileira de Pavimentação.

SHASHIDHAR, N.; NEEDHAM, S.P.; CHOLLAR, B.H. (1999). *Prediction of the Performance of Mineral Fillers in Stone Matrix Asphalt*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT. V.68, p. 222-251. Chicago, Illinois, EUA.

SHRP (1993). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies*. Strategic Highway Research Program. National Academy of Science, Washington, D.C.

SMITH, D. (1996). Characterization of Lactose by Helium Pycnometer. In Stephens, K. (ed.), *The Microreport: News and Ideas for Decision Makers*, 2nd Quarter, 7(2) Micro-meritics Instrument Corporation, USA.

SOARES, J.B.; CAVALCANTE, V.T.F. (2001) *o Efeito do Tipo e do Teor de Fíler nas Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas*. Anais da 33ª Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis-SC.

SOCIETY OF WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY (1997). *Environmental implications of the use of wood-based products*. Site: www.fpl.fs.us/swst/environ.html.

SOUZA, J.N.; RODRIGUES, J.K.G; SOUZA NETO, P.N. (1998). *Utilização do Resíduo Proveniente da Serragem de Rochas Graníticas como Material de Enchimento em Concretos Asfálticos Usinados a Quente*. Federação das Indústrias do Estado do Ceará – IEL. (<http://www.sfieec.org.br/>).

SUCHSLAND, O.; LYON, D. E.; SHORT, P. E. (1978). *Selected properties of commercial medium-density fiberboards*. Forest Products Journal, v.28, n.9, p.45-48.

SUCHSLAND, O.; WOODSON, G.E. (1987). *Fiberboard Manufacturing Practices in United States*. Washington, D.C.: USDA, 1986. 263p. (USDA. Agricultural Handbook nº640).

VAVRIK, W. R. (2000). *Quality Control of Hot-Mix Asphalt: Controlling Aggregate Interlock through the Bailey Method*. Proceedings of the 1st International Conference on Quality Control and Quality Assurance of Construction Materials, Dubai, Emirados Árabes.

VAVRIK, W. R.; HUBER, G. A.; PINE, W. J.; CARPENTER, S. H.; BAILEY, R.(2001). *The Bailey Method of Gradation Evaluation: The Influence of Aggregate Gradation and*

Packing Characteristics on Voids in Mineral Aggregate. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 70.

VAVRIK, W. R.; HUBER, G. A.; PINE, W. J. ;CARPENTER, S. H.; BAILEY, R. (2002a). *Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design*. Transportation Research record, Circular n E-C044.

VAVRIK, W. R.; PINE, W. J.; CARPENTER, S. H. (2002b). *Aggregate Blending for Asphalt Mix Design – Bailey Method*. Transportation Research Record, Paper no 02-3629, p.146-153.

XU, H.; SUCHSLAND, O. (1991). *The Expansion Potential: A New Evaluator of the Expansion Behavior of Wood Composites*. Forest Products Journal, v.41, n.6, p.39-42.

ZEGARRA, J.R.E. (2007). *Avaliação de Misturas Produzidas com Ligantes Asfálticos Peruanos Convencional PEN 60/70 e Modificados por Polímeros SBS Tipo I 60/60 e PG 76-22*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 234p. São Carlos.

YOUNGQUIST, J. A. (1998). *Wood-based composites – The panel and building components of the future*. Proceedings. IUFRO, Canadá, p.5-2.

WEBB, P.A., ORR, C., (1997). *Analytical Methods in Fine Particle Technology*. Micromeritics Instrument Corporation, USA, 301 pp.

APÊNDICE – EXEMPLO DE SELEÇÃO

GRANULOMÉTRICA PELO MÉTODO BAÍLEY

Primeiramente foram realizados os ensaios para a determinação da *massa específica solta* (*MÊS*) dos agregados graúdos e da *massa específica compactada* (*MEC*) do agregado fino e do agregado graúdo, de acordo com a norma AASHTO T-19/T (AASHTO, 1997).

O passo seguinte é a determinação da massa específica escolhida para cada agregado graúdo (MEE_g), que é realizada através da MES de cada um dos dois agregados graúdos (Pedra 1 e pedrisco) e a massa específica escolhida para o agregado fino (MEE_f), que é a massa específica compactada do agregado fino. A massa específica escolhida do agregado graúdo é dada pela Equação 1.

$$MEE_g = MES \times MES_d \quad (1)$$

onde:

MEE_g : massa específica escolhida de cada agregado graúdo (kg/m^3);

MES: massa específica solta de cada agregado graúdo (kg/m^3);

MES_d : quantidade desejada da massa específica solta (%).

Em seguida determina-se a massa específica contribuinte dos agregados graúdos, de acordo com a proporção desejada, através do volume do agregado graúdo. Essa determinação é feita através da Equação 2:

$$CAG = MEE_{g1} \times AG_1 + MEE_{g2} \times AG_2 \quad (2)$$

onde:

CAG: contribuição total dos agregados graúdos na mistura (kg/m³);

MEE_{g1}: massa específica escolhida da pedra1 (kg/m³);

AG₁: contribuição da pedra1 (%);

MEE_{g2}: massa específica escolhida do pedrisco (kg/m³);

AG₂: contribuição do pedrisco (%).

Depois são determinados os vazios no agregado graúdo, ou os vazios que são preenchidos pelos agregados finos, de acordo com a sua massa específica escolhida e sua contribuição em volume. Depois, são somados os vazios de cada agregado graúdo. O cálculo é feito através da Equação 3:

$$VAG = \left(1 - \frac{MEE_{g1}}{G_{sb1} \times 1000}\right) \times AG_1 + \left(1 - \frac{MEE_{g2}}{G_{sb2} \times 1000}\right) \times AG_2 \quad (3)$$

onde:

VAG: vazios no agregado graúdo (%);

MEE_{g1}: massa específica escolhida da pedra 1 (kg/m³);

G_{sb1}: massa específica da pedra 1 (kg/m³);

AG₁: contribuição da pedra 1 (%);

MEE_{g2}: massa específica escolhida do pedrisco (kg/m³);

G_{sb2}: massa específica do pedrisco (kg/m³);

AG₂: contribuição do pedrisco (%).

A contribuição dos agregados finos é dada em função da massa específica escolhida do agregado fino, da porcentagem em volume desse agregado na mistura de agregado fino e do VAG, sendo determinada através da Equação 4:

$$CAF = MEE_f \times AF \times VAG \quad (4)$$

onde:

CAF: contribuição total dos agregados finos na mistura (kg/m³);

MEE_f: massa específica escolhida do agregado fino (kg/m³);

AF: contribuição do pó de pedra (%).

A massa específica da mistura é dada pela soma da contribuição de cada uma das massas específicas dos agregados utilizados, representada pela Equação 5:

$$MEM = CAG + CAF \quad (5)$$

onde:

MEM: massa específica da mistura (kg/m³);

CAG: contribuição total dos agregados graúdos na mistura (kg/m³);

CAF: contribuição total dos agregados finos na mistura (kg/m³);

Com esses dados, determina-se a porcentagem inicial de cada agregado da mistura de agregados através das Equações 6; 7; 8 e 9:

$$AG_1 = \frac{CAG_1}{MEM} \quad (6)$$

$$AG_2 = \frac{CAG_2}{MEM} \quad (7)$$

$$AG = AG_1 + AG_2 \quad (8)$$

$$AF = \frac{CAF}{MEM} \quad (9)$$

onde:

AG_1 : quantidade de pedra 1 na mistura (%);

AG_2 : quantidade de pedrisco na mistura (%);

AG : quantidade de agregado graúdo na mistura (%);

AF : quantidade de pó de pedra na mistura (%);

MEM : massa específica da mistura (kg/m^3);

CAG_1 : contribuição da pedra 1 na mistura (kg/m^3);

CAG_2 : contribuição do pedrisco na mistura (kg/m^3);

CAF : contribuição do pó de pedra na mistura (kg/m^3);

Para o próximo passo deve-se determinar a peneira de controle primário (PCP), que é dada pela multiplicação do diâmetro máximo nominal do agregado (DMN) pelo fator de controle (FC) (Equação 6.19). Deve-se também determinar a peneira média (PM), que é a peneira de

abertura mais próxima da metade do DMN, para controlar melhor a compactação do agregado graúdo.

$$PCP = DMN \times FC \quad (10)$$

onde:

PCP: peneira de controle primário (mm);

DMN: diâmetro máximo nominal dos agregados (mm);

FC: fator de controle = 0,22.

Utiliza-se também a peneira de controle secundário (PCS) e a peneira de controle terciário (PCT), determinadas pelas Equações 11 e 12:

$$PCS = PCP \times FC \quad (11)$$

$$PCT = PCS \times FC \quad (12)$$

onde:

PCS: peneira de controle secundário (mm);

PCP: peneira de controle primário (mm);

FC: fator de controle = 0,22;

PCT: peneira de controle terciário (mm).

Com isso, faz-se a divisão dos agregados graúdos dos finos, separa-se a fração graúda da fração fina do agregado fino e estuda-se a fração fina do agregado fino.

Com o valor da PCP pode-se quantificar o material passante nessa peneira para a pedra 1 (QAG_1) e para o pedrisco (QAG_2) e o retido (QAF). Com esses dados calcula-se a quantidade de finos no agregado graúdo (PFG) e a quantidade de graúdos no agregado fino (PGF) através das Equações 13; 14 e 15:

$$PFG_1 = AG_1 \times QAG_1 \quad (13)$$

$$PFG_2 = AG_2 \times QAG_2 \quad (14)$$

$$PGF = AF \times QAF \quad (15)$$

onde:

PFG_1 : quantidade de finos na pedra 1 (%);

AG_1 : quantidade de pedra 1 na mistura (%);

QAG_1 : quantidade de pedra 1 passante na PCP (%);

PFG_2 : quantidade de finos no pedrisco (%);

AG_2 : quantidade de pedrisco na mistura (%);

QAG_2 : quantidade de pedrisco passante na PCP (%);

PGF : quantidade de graúdos no agregado fino (%);

AF : quantidade de pó de pedra na mistura (%);

QAF : quantidade de pó de pedra retida na PCP (%).

A partir desses resultados são ajustadas as porcentagens iniciais da pedra 1 (AG_{1f}), do pedrisco (AG_{2f}) e do pó de pedra (AF_f) na mistura, através das Equações 16; 17 e 18:

$$AG_{1f} = AG_1 + PFG_1 - \left(\frac{AG_1 \times PGF}{AG} \right) \quad (16)$$

$$AG_{2f} = AG_2 + PFG_2 - \left(\frac{AG_2 \times PGF}{AG} \right) \quad (17)$$

$$AF_f = AF + PFG - \left(\frac{AF \times PGF}{AF} \right) \quad (18)$$

onde:

AG_{1f} : quantidade corrigida de pedra 1 na mistura (%);

AG_1 : quantidade de pedra 1 na mistura (%);

PFG_1 : quantidade de finos na pedra 1 (%);

AG : quantidade de agregado graúdo na mistura (%);

AG_{2f} : quantidade corrigida de pedrisco na mistura (%);

AG_2 : quantidade de pedrisco na mistura (%);

PFG_2 : quantidade de finos no pedrisco (%);

AF_f : quantidade corrigida de pó de pedra na mistura (%);

AF : quantidade de pó de pedra na mistura (%);

PGF : quantidade de grãos no agregado fino (%).

Deve-se determinar a quantidade de material contribuinte passante na peneira 0,075 mm para cada agregado, utilizando as porcentagens ajustadas dos materiais, multiplicando-se a porcentagem passante na peneira 0,075 mm do agregado pela porcentagem ajustada da mistura do agregado, através das Equações 19; 20 e 21:

$$PCF_1 = AG_{1f} \times FG_1 \quad (19)$$

$$PCF_2 = AG_{2f} \times FG_2 \quad (20)$$

$$PCF_f = AF \times FF \quad (21)$$

Onde:

PCF₁: quantidade contribuinte da peneira 0,075 mm da pedra 1 (%);

AG_{1f}: quantidade corrigida de pedra 1 na mistura (%);

FG₁: quantidade passante na peneira 0,075mm da pedra 1 (%);

PCF₂: quantidade contribuinte da peneira 0,075 mm do pedrisco (%);

AG_{2f}: quantidade corrigida de pedrisco na mistura (%);

FG₂: quantidade passante na peneira 0,075mm do pedrisco (%);

PCF_f: quantidade contribuinte da peneira 0,075 mm do agregado fino (%);

AF: quantidade corrigida de pó de pedra na mistura (%);

FF: quantidade passante na peneira 0,075mm do agregado fino (%).

Com isso deve-se determinar a quantidade de filer (FM) requerido para trazer a porcentagem passante na peneira 0,075mm para o nível desejado, através Equação 22:

$$FM = \left(\frac{FM_{des} - (PCF_1 + PCF_2 + PCF_f)}{100\%} \right) \quad (22)$$

Onde:

FM: quantidade de filer na mistura calculada (%);

FM_{des}: quantidade de filer desejado na mistura (%).

Para a determinação da porcentagem final da porção de agregado fino adiciona-se a porcentagem de filer ao agregado fino e, então, a porcentagem de agregado fino na mistura é ajustada pela quantidade de filer (Equação 23).

$$AF_{ft} = AF - \left(\frac{AF \times FM}{AF} \right) \quad (23)$$

onde:

AF_{ft}: quantidade final de agregado fino na mistura (%);

AF: quantidade corrigida de agregado fino na mistura (%);

FM: quantidade de filer na mistura calculada (%).

A partir das curvas granulométricas da pedra 1, do pedrisco e do pó de pedra é calculada a curva granulométrica, somando-se a multiplicação de cada quantidade retida em cada peneira pela quantidade corrigida de cada material.

O método recomenda que a proporção dos agregados graúdos (PAG), a proporção graúda dos agregados finos (PGAF) e a proporção fina dos agregados finos (PFAF) fiquem dentro de intervalos, de acordo com o DMN (Tabela 1), para que a mistura apresente bons resultados (ILDEFONSO, 2007).

Tabela 1: Intervalos recomendados para PAG, PGAF e PFAF

DMN (mm)	PAG	PGAF	PFAF
37,5	0,80 - 0,95	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50
25	0,70 - 0,85	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50
19	0,60 - 0,75	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50
12,5	0,50 - 0,65	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50
9,5	0,40 - 0,55	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50
4,75	0,30 - 0,45	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50

Esses parâmetros são calculados através das Equações 24, 25 e 26.

$$PAG = \frac{PM_p - PCP_p}{1 - PM_p} \quad (24)$$

$$PGAF = \frac{PCS_p}{PCP_p} \quad (25)$$

$$PFAF = \frac{PCT_p}{PCS_p} \quad (26)$$

onde:

PAG: proporção dos agregados graúdos (%);

PM_p: quantidade passada na peneira média (%);

PCP_p: quantidade passada na peneira de controle primário (%);

PGAF: proporção graúda dos agregados finos (%);

PCS_p: quantidade passada na peneira de controle secundário (%);

PCT_p: quantidade passada na peneira de controle terciário (%).

ANEXO A – ENSAIO DE PICNOMETRIA DE GÁS HÉLIO

Centro de Caracterização e
Desenvolvimento de Materiais
UFSCar / UNESP

CERTIFICADO LCP07-000893

Vivian Silveira dos Santos Bardini.
Endereço: Avenida de Trabalhador São-Carlense, 400.
Cidade: São Carlos. Estado: SP.
CEP: 13566-590. Data de recebimento da(s) amostra(s): 05/12/07.
OS: 26196. Período de realização: 07/12/07 – 21/12/07.

ENSAIO DE PICNOMETRIA DE GÁS HÉLIO EM RESÍDUO DE CINZAS

1 – OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é determinar a densidade real de um resíduo (cinzas) por picnometria de gás hélio.

2 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A amostra foi identificada conforme descrito na tabela 1.

Tabela 1 – Identificação da amostra.

Identificação CCDM	Identificação cliente
LCP071838	Resíduo - Cinzas

3 – METODOLOGIA

3.1 – Densidade real por picnometria de hélio

Este método de medida de densidade utiliza o princípio de Arquimedes de deslocamento de fluidos. A determinação da densidade real de materiais poliméricos pode ser realizado conforme norma ISO 1183-3 – "Plastics – Methods for determining the density of non-cellular plastics – Part 3: Gas pycnometer method". A densidade real média da amostra é o resultado de cinco medidas, realizadas em 20 de dezembro de 2007. Foi utilizado um equipamento modelo Ultrapycnometer 1000, da Quantachrome. A amostra foi seca a 100°C por 2 horas em estufa com circulação de ar antes de ser analisada.

4 – RESULTADOS

4.1 – Densidade real por picnometria de hélio

A tabela 2 apresenta os valores de densidade real da amostra LCP071838.

A reprodução deste certificado deve ser realizada na íntegra. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que se possa fazer deste documento.

Página 1 de 2

Via Washington Luiz, Km 235 - Caixa Postal 60
13560-971 - São Carlos - SP - Brasil
Fone (55) (16) 3361 1707 - Fax (55) (16) 3361 1160
E-mail: ccdm@ccdm.ufscar.br
www.ccdm.ufscar.br

Centro de Caracterização e
Desenvolvimento de Materiais
UFSCar / UNESP

CERTIFICADO LCP07-000893

Tabela 2 – Valores de densidade real da amostra LCP071838 – determinado por picnometria de hélio.

Amostra	Medidas					Média
	1	2	3	4	5	
LCP071838	2,463	2,343	2,286	2,264	2,256	2,322 ± 0,086

São Carlos, 21 de Dezembro de 2007.

Dr. Marcelo A. Chinelatto
Supervisor Técnico
E-mail: mchinelatto@ccdm.ufscar.br

Cláusulas de responsabilidade:

- A amostragem relativa a este relatório é de responsabilidade do cliente e estes resultados referem-se apenas as amostras ensaiadas (não extensivo a outras amostras);
- As amostras serão mantidas pelo prazo de 2 meses após a emissão deste documento ou devolvidas, se solicitado pelo cliente. Se forem destrutíveis serão mantidos somente os registros do serviço. Quando aplicável, a contra prova da amostra será mantida pelo prazo máximo de 1 ano, após a emissão deste documento. Os registros deste serviço serão mantidos por 5 anos.

A reprodução deste certificado deve ser realizada na íntegra. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que se possa fazer deste documento.

Página 2 de 2

Via Washington Luiz, Km 235 - Caixa Postal 60
13560-971 - São Carlos - SP - Brasil
Fone (55) (16) 3361 1707 - Fax (55) (16) 3361 1160
E-mail: ccdm@ccdm.ufscar.br
www.ccdm.ufscar.br

ANEXO B – ANÁLISE DO RESÍDUO

Ensaio realizado no Laboratório de Saneamento, do Departamento de Hidráulica e Saneamento, da Escola de Engenharia de São Carlos-USP.

INTERESSADO: VIVIAN – STT – EESC – USP
AMOSTRA: CINZA DE MADEIRA

ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS-NBR-10.005/2004

ENSAIOS EFETUADOS DE ACORDO COM A 21ª EDIÇÃO DO STANDARD METHODS

PARÂMETRO	UNIDADE	CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO	RESULTADO AMOSTRA 1	LIMITE MÁXIMO NO LIXIVIADO	LIMITE DE DETECÇÃO
INORGÂNICOS					
ARSÊNIO	mg As/L	D005	0,01	1,0	0,0001
BÁRIO	mg Ba/L	D006	0,05	70,0	0,001
CÁDMIO	mg Cd/L	D007	0,05	0,5	0,0006
CHUMBO	mg Pb/L	D008	0,03	1,0	0,01
CROMO TOTAL	mg Cr/L	D009	< LD	5,0	0,005
FLUORETOS	mg F/L	D010	1,31	150,0	0,01
MERCÚRIO	mg Hg/L	D011	0,01	0,1	0,0001
PRATA	mg Ag/L	D012	0,04	5,0	0,001
SELÊNIO	mg Se/L	D013	0,03	1,0	0,001
pH DO LIXIVIADO		N.A	5,79	N.A.	0

LIMITE MÁXIMO NO LIXIVIADO – ANEXO F (NORMATIVO).

LD = LIMITE DE DETECÇÃO.

N.A = NÃO SE APLICA.

OS RESULTADOS APRESENTADOS NESTE CERTIFICADO REFEREM-SE EXCLUSIVAMENTE ÀS AMOSTRAS ENVIADAS AO LABORATÓRIO, NA DATA DA COLETA INFORMADA PELO INTERESSADO.

INTERESSADO: VIVIAN – STT – EESC – USP
 AMOSTRA: CINZA DE MADEIRA

ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS-NBR-10.006/2004

ENSAIOS EFETUADOS DE ACORDO COM A 21ª EDIÇÃO DO STANDARD METHODS

PARÂMETRO	UNIDADE	RESULTADO AMOSTRA 1	LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO (mg/L)	LIMITE DE DETECÇÃO
ALUMÍNIO	mg Al/L	0,06	0,2	0,01
ARSENIO	mg As/L	< LD	0,01	0,0001
BÁRIO	mg Ba/L	0,03	0,7	0,001
CÁDMIO	mg Cd/L	< LD	0,005	0,0006
CHUMBO	mg Pb/L	< LD	0,01	0,01
CIANETOS	mg CN/L	< LD	0,07	0,001
CLORETOS	mg Cl/L	12,4	250,0	0,01
COBRE	mg Cu/L	0,02	2,0	0,003
CROMO TOTAL	mg Cr/L	< LD	0,05	0,005
FENÓIS TOTAIS	mg C ₆ H ₅ OH	0,044	0,01	0,001
FERRO TOTAL	mg Fe/L	0,08	0,3	0,005
FLUORETOS	mg F/L	1,36	1,5	0,01
MANGANÊS	mg Mn/L	0,16	0,1	0,003
MERCÚRIO	mg Hg/L	< LD	0,001	0,0001
NITRATOS	mg N/L	0,51	10,0	0,01
PRATA	mg Ag/L	0,04	0,05	0,001
SELÊNIO	mg Se/L	< LD	0,01	0,001
SÓDIO	mg Na/L	50,0	200,0	0,1
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ /L	540	250,0	1
SURFACTANTES	mg LAS/L	0,4	0,5	0,1
ZINCO	mg Zn/L	0,06	5,0	0,02
pH DO SOLUBILIZADO		8,20	N.A.	0

LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO – ANEXO G (NORMATIVO) – PADRÕES PARA O ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO (mg/L).

LD = LIMITE DE DETECÇÃO.

N.A. = NÃO SE APLICA.

OS RESULTADOS APRESENTADOS NESTE CERTIFICADO REFEREM-SE EXCLUSIVAMENTE ÀS AMOSTRAS ENVIADAS AO LABORATÓRIO, NA DATA DA COLETA INFORMADA PELO INTERESSADO.