

**MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO:
ESTUDO EM LABORATÓRIO UTILIZANDO EMULSÃO E
AGENTE DE RECICLAGEM EMULSIONADO**

Daniela de David

Porto Alegre

Setembro 2006

DANIELA DE DAVID

**MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO:
ESTUDO EM LABORATÓRIO UTILIZANDO EMULSÃO E
AGENTE DE RECICLAGEM EMULSIONADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre

Setembro 2006

D249m David, Daniela de

Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado / Daniela de David. – 2006.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2006.

Orientação: Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti

1. Pavimentação – Ensaios. 2. Misturas asfálticas. 3. Engenharia Civil. I. Ceratti, Jorge Augusto Pereira, orient. II. Título.

CDU-625.85(043)

DANIELA DE DAVID

**MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO:
ESTUDO EM LABORATÓRIO UTILIZANDO EMULSÃO E
AGENTE DE RECICLAGEM EMULSIONADO**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua fase final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 01 de setembro de 2006.

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
Dr. pela UFRJ
Orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luciano Pivoto Specht (UNIJUÍ/RS)
Dr. pelo PPGEC/UFRGS

Profa. Suyen Matsumura Nakahara (UFRGS)
Dra. pela USP

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pelo PPGEC/UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais,
pelo amor e apoio.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pelo dom da vida e por me permitir chegar até aqui.

Ao professor orientador, Jorge Augusto Pereira Ceratti, pela oportunidade oferecida, pela confiança depositada, pela paciência e pelas orientações prestadas ao longo do curso.

A todos os professores do mestrado em Geotecnia e funcionários do PPGEC. Professores Washington Peres Núñez, Luiz Antonio Bressani e Way Ying Yuk Gehling, obrigada pelo apoio. Aos bolsistas do LAPAV, Diego Treichel e Vinícius Barp, agradeço pela disponibilidade.

Aos queridos colegas e engenheiros do Centro de Pesquisas Rodoviárias do DAER: Jayme Tonon, Joel Silveira, José Augusto de Oliveira, Lineo Lopes Loder, Mara Regina Bianchini, Marlova Grazziotin Jonhston e Maria Cristina Ferreira Passos. Muito obrigada! Todos vocês contribuíram muito, de uma forma ou outra, para a conclusão deste trabalho. Também agradeço às amigas e colegas do DAER, pelo apoio e incentivo: Ana Paula Pestana Cardoso, Andréa Schopf, Bibiana Fogaça e Diana Denardi.

Ao DAER, pela disponibilidade de tempo e equipamentos. A todos os funcionários do Centro de Pesquisas Rodoviárias que contribuíram para a realização desta pesquisa.

À Prefeitura Municipal de Porto Alegre, em especial ao Eng. Assis Arrojo, obrigada pela atenção e fornecimento da amostra.

À Pedraccon, pelo fornecimento de material pétreo e à Cientec, pelos ensaios realizados.

À Betunelkoch e seus engenheiros Adriana da Silva Pinto, Rômulo Constantino e Leandro Liberatori, pelos materiais asfálticos, pelos ensaios realizados e pelo apoio técnico oferecido.

À Ciber, em especial ao Eng. Clauci Mortari, pelo suporte técnico disponibilizado.

Ao Eng. Rafael Martins de Reis, pelos esclarecimentos, pelo apoio técnico e pela amizade.

Ao Eng. Armando Morilha, pelas informações técnicas oferecidas.

À minha grande e querida família e a todos os meus amigos, pela força, pelo carinho, pela amizade e pela compreensão durante o tempo dedicado a este trabalho.

RESUMO

DAVID, D. **Misturas Asfálticas Recicladas a Frio: Estudo em Laboratório Utilizando Emulsão e Agente de Reciclagem Emulsionado.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A reciclagem de pavimentos já foi executada em alguns trechos de rodovias brasileiras, contudo existem poucos estudos sobre o assunto. Com a finalidade de contribuir para a ampliação dos conhecimentos na área de reciclagem de pavimentos, a presente dissertação propõe um estudo laboratorial de misturas asfálticas recicladas a frio. O principal objetivo deste trabalho foi verificar o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a frio, através dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral, para fins de utilização como camada de base na restauração de pavimentos. As misturas asfálticas foram produzidas com material fresado proveniente de revestimentos asfálticos envelhecidos e com dois tipos de ligantes: emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta RL-1C e agente de reciclagem emulsionado ARE-75. Avaliou-se, também, o comportamento dessas misturas quando um agregado novo foi adicionado. Foram realizados ensaios de caracterização dos ligantes, do material fresado e do agregado virgem. As misturas foram estudadas através do método Marshall para misturas asfálticas a frio. Os resultados de módulo de resiliência e resistência à tração mostraram que as misturas asfálticas analisadas apresentam comportamento mecânico semelhante ao que se tem obtido para as misturas asfálticas recicladas a frio. Outros parâmetros, tais como massa específica máxima, estabilidade, fluência, massa específica aparente, volume de vazios e resistência à tração retida também foram avaliados.

ABSTRACT

DAVID, D. Misturas Asfálticas Recicladas a Frio: Estudo em Laboratório Utilizando Emulsão e Agente de Reciclagem Emulsionado. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Asphalt pavement recycling has already been carried out in some Brazilian highways although few studies are found on the subject. Aiming to contribute for a deeper view in the pavement recycling area the present work presents a study performed in laboratory on asphalt cold-mix recycling. The main objective was to investigate the mechanical behavior of asphalt cold-mix recycling through tensile strength and resilient modulus tests to use it as a layer base in pavement reclaiming. The asphalt mixtures were made from reclaimed asphalt pavement obtained from aged asphalt pavement and with two types of binders: cationic asphalt emulsion slow-setting RL-1C and an emulsified recycling agent ARE-75. It was also assessed the behavior of those mixtures when a new aggregate was added. Tests of characterization of binder, reclaimed asphalt pavement and new aggregate were performed. The mixtures were studied using Marshall method for asphalt cold mixture. The results of resilient modulus and tensile strength indicated that the asphalt mixtures analysed showed similar mechanical behavior to the recycled cold asphalt mixtures. Maximum specific gravity, stability, flow, density, air voids content and retained tensile strength were assessed as well.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	19
2.2 BREVE HISTÓRICO.....	20
2.3 TIPOS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	22
2.3.1 Reciclagem a frio.....	23
2.3.1.1 Reciclagem a frio em usina.....	23
2.3.1.2 Reciclagem a frio <i>in situ</i>	24
2.3.1.2.1 <i>Reciclagem do revestimento asfáltico (reciclagem parcial)</i>	24
2.3.1.2.2 <i>Reciclagem do revestimento asfáltico e camadas granulares (reciclagem total)</i>	27
2.3.1.2.3 <i>Vantagens da reciclagem a frio in situ</i>	28
2.3.2 Reciclagem a quente.....	29
2.3.2.1 Reciclagem a quente em usina.....	30
2.3.2.2 Reciclagem a quente <i>in situ</i>	30
2.4 AGENTES DE RECICLAGEM A FRIO.....	31
2.4.1 Emulsões asfálticas.....	32
2.4.2 Agentes de reciclagem emulsionados.....	35
2.4.3 Efeitos do agente de reciclagem a frio na mistura asfáltica reciclada	36
2.5 AMOSTRAGEM PARA PROJETO DE MISTURA RECICLADA A FRIO.....	39
2.5.1 Amostragem na pista.....	39
2.5.2 Amostragem em pilhas de estocagem.....	41
2.6 PROJETOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO	42

2.6.1 Métodos de projeto.....	43
2.6.2 Dados de projetos e de estudos de laboratório.....	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1 RELAÇÃO DE ENSAIOS.....	52
3.2 MATERIAIS PÉTREOS.....	53
3.2.1 Material fresado.....	53
3.2.1.1 Caracterização do material fresado.....	55
3.2.1.1.1 <i>Análise granulométrica por peneiramento.....</i>	<i>55</i>
3.2.1.1.2 <i>Determinação do teor de asfalto.....</i>	<i>57</i>
3.2.1.1.3 <i>Determinação do índice de lamelaridade.....</i>	<i>58</i>
3.2.1.1.4 <i>Determinação das partículas chatas e alongadas.....</i>	<i>58</i>
3.2.1.1.5 <i>Determinação do desgaste por abrasão Los Angeles.....</i>	<i>59</i>
3.2.1.1.6 <i>Determinação do equivalente de areia.....</i>	<i>60</i>
3.2.1.1.7 <i>Determinação da massa específica real, aparente e absorção.....</i>	<i>60</i>
3.2.2 Agregado adicional.....	61
3.2.2.1 Caracterização do agregado adicional.....	61
3.3 MATERIAIS ASFÁLTICOS.....	61
3.3.1 Materiais asfálticos utilizados.....	62
3.3.2 Métodos de ensaios utilizados para caracterização dos materiais asfálticos.....	62
3.3.2.1 Viscosidade Saybolt Furol.....	62
3.3.2.2 Peneiramento.....	63
3.3.2.3 Sedimentação.....	63
3.3.2.4 Mistura com cimento.....	63
3.3.2.5 Carga da partícula.....	63
3.3.2.6 Resíduo por evaporação.....	64
3.3.2.7 Resíduo por destilação.....	64
3.3.2.8 Penetração.....	64
3.3.2.9 Ponto de amolecimento anel e bola.....	65
3.3.2.10 Ductilidade.....	66
3.3.2.11 Recuperação de asfalto pelo método rotavapor.....	66
3.3.3 Caracterização do ligante recuperado do material fresado.....	67

3.3.4	Caracterização da emulsão asfáltica RL-1C.....	68
3.3.5	Caracterização do agente de reciclagem emulsionado ARE-75.....	68
3.4	MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS.....	69
3.4.1	Definição da composição granulométrica.....	69
3.4.2	Moldagem dos corpos-de-prova.....	71
3.4.2.1	Secagem das amostras.....	72
3.4.2.2	Fracionamento das amostras.....	72
3.4.2.3	Pesagem dos materiais pétreos dos corpos-de-prova.....	72
3.4.2.4	Adição de água.....	73
3.4.2.5	Mistura e adição de ligante.....	74
3.4.2.6	Umidade de compactação.....	75
3.4.2.7	Compactação dos corpos-de-prova.....	76
3.4.3	Determinação da massa específica máxima de misturas asfálticas.....	78
3.4.4	Metodologia Marshall.....	79
3.4.5	Resistência à tração por compressão diametral.....	82
3.4.6	Módulo de resiliência.....	84
3.4.7	Efeito da água na resistência à tração de misturas asfálticas.....	86
3.4.8	Verificação da granulometria e do teor de asfalto.....	88
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	89
4.1	ÁGUA DE MOLHAGEM.....	89
4.2	MASSAS ESPECÍFICAS MÁXIMAS.....	91
4.3	CARACTERÍSTICAS MARSHALL.....	92
4.3.1	Estabilidade e Fluência.....	92
4.3.2	Massa específica aparente.....	95
4.3.3	Volume de vazios.....	96
4.4	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	97
4.5	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	99
4.6	EFEITO DA ÁGUA NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	101

4.7 VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA E DO TEOR DE ASFALTO.....	103
4.8 RESUMO.....	104
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	105
5.1 CONCLUSÕES.....	105
5.2 SUGESTÕES.....	107
REFERÊNCIAS.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Equipamento para fresagem a frio.....	22
Figura 2: Reciclagem a frio em usina.....	24
Figura 3: Reciclagem a frio <i>in situ</i> do revestimento asfáltico.....	25
Figura 4: Unidade simples de reciclagem.....	26
Figura 5: Unidade múltipla de reciclagem.....	26
Figura 6: Critérios para seleção da reciclagem de revestimentos asfálticos a frio <i>in situ</i>	27
Figura 7: Reciclagem a frio <i>in situ</i> do revestimento asfáltico e camada granular.....	28
Figura 8: Esquema de operação da reciclagem a quente <i>in situ</i> com fresagem a quente	31
Figura 9: Estrutura para proteger e minimizar a umidade no material fresado.....	42
Figura 10: Relação de ensaios.....	52
Figura 11: Depósito do material fresado.....	54
Figura 12: Amostragem do material fresado.....	54
Figura 13: Aspecto visual do material fresado.....	55
Figura 14: Análises granulométricas médias do material fresado.....	57
Figura 15: Calibrador proporcional utilizado para a determinação das partículas chatas e alongadas.....	59
Figura 16: Penetrômetro eletrônico.....	65
Figura 17: Equipamento eletrônico para ensaio de ponto de amolecimento.....	66
Figura 18: Rotavapor - equipamento para recuperação de asfalto.....	67
Figura 19: Faixas granulométricas especificadas e granulometrias das misturas recicladas.....	70
Figura 20: Composição dos corpos-de-prova.....	73
Figura 21: Adição de água antes da adição de ligante.....	74
Figura 22: Mistura com água e adição de ligante.....	74
Figura 23: Compactadores mecânicos tipo Marshall.....	76
Figura 24: Conjunto de corpos-de-prova moldados para cada mistura ensaiada.....	77

Figura 25: Parte interna dos corpos-de-prova para cada tipo de mistura estudada com 3,0 % de ligante asfáltico.....	78
Figura 26: Equipamentos para determinação da massa específica máxima.....	79
Figura 27: Prensa Marshall eletrônica.....	81
Figura 28: Curvas “carga - deslocamento” para determinação da estabilidade e fluência Marshall.....	82
Figura 29: Corpo-de-prova durante o ensaio de resistência à tração.....	84
Figura 30: Equipamento para ensaio de módulo de resiliência.....	86
Figura 31: Equipamentos para determinação da resistência à tração retida.....	87
Figura 32: Resultados de estabilidade, fluência, massa específica e volume de vazios com o aumento da água de molhagem para a mistura Fresado+RL-1C com 1,5 % de RL-1C.....	90
Figura 33: Massa específica máxima <i>versus</i> teor de ligante.....	91
Figura 34: Exemplo de curvas obtidas através da prensa Marshall automatizada.....	93
Figura 35: Estabilidade <i>versus</i> teor de ligante.....	94
Figura 36: Fluência <i>versus</i> teor de ligante.....	94
Figura 37: Massa específica aparente <i>versus</i> teor de ligante.....	95
Figura 38: Volume de vazios <i>versus</i> teor de ligante.....	97
Figura 39: Variação da resistência à tração com o teor de ligante.....	98
Figura 40: Variação do módulo de resiliência com o teor de ligante.....	100
Figura 41: Resistência à tração seca e após imersão para diferentes teores de ligante e misturas.....	102
Figura 42: Variação da resistência à tração retida para diferentes teores de ligante e misturas.....	103
Figura 43: Resumo das análises dos resultados.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Materiais utilizados nos pavimentos com revestimento asfáltico.....	16
Tabela 2: Proposta de especificação para os agentes de reciclagem emulsionados.....	36
Tabela 3: Faixas granulométricas de misturas recicladas a frio - combinação do material asfáltico fresado e agregado virgem.....	46
Tabela 4: Análises granulométricas dos materiais fresados empregados em projetos de misturas asfálticas recicladas com emulsão.....	48
Tabela 5: Características de projeto de misturas asfálticas recicladas com emulsão.....	48
Tabela 6: Análises granulométricas do material fresado.....	56
Tabela 7: Análises granulométricas do material fresado após extração do asfalto envelhecido.....	57
Tabela 8: Caracterização do pó de pedra.....	61
Tabela 9: Caracterização do asfalto envelhecido recuperado.....	67
Tabela 10: Caracterização da emulsão RL-1C.....	68
Tabela 11: Caracterização do agente de reciclagem emulsionado ARE-75	69
Tabela 12: Granulometrias das misturas empregadas no estudo laboratorial.....	71
Tabela 13: Fracionamento das amostras.....	72
Tabela 14: Resultados de volume de vazios.....	96
Tabela 15: Resultados de módulo de resiliência.....	100
Tabela 16: Resultados de resistência à tração retida.....	101
Tabela 17: Resultados da verificação da granulometria e do teor de asfalto.....	104

LISTA DE SIGLAS

ABEDA: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AR: Agente de Reciclagem

ARE: Agente de Reciclagem Emulsionado

ARRA: Asphalt Recycling and Reclaiming Association

ASTM: American Society for Testing and Materials

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia

DAER/RS: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes

FHWA: Federal Highway Administration

IBP: Instituto Brasileiro de Petróleo

ISSA: International Slurry Surfacing Association

LCPC: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LVDT: Linear Variable Differential Transducer

RL: Ruptura Lenta

RM: Ruptura Média

RR: Ruptura Rápida

SCORE: Superior Cold Recycling

SMA: Stone Matrix Asphalt

SUPERPAVE: Superior Performing Asphalt Pavements

TRB: Transportation Research Board

USACE: United States Army Corps of Engineers

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, uma parte significativa da rede pavimentada brasileira, apresenta-se com pavimentos deteriorados. A idade dos pavimentos, a solicitação intensa do tráfego, o excesso de carga e a falta de manutenção no momento oportuno compõem o problema.

Este cenário representa um grande desafio para os técnicos, que têm que conservar um grande patrimônio com recursos financeiros sempre escassos, buscando soluções técnicas inovadoras, alternativas às tradicionais, que permitam aproveitar os recursos de uma maneira mais racional e eficiente.

Os métodos de restauração de superfície mais empregados, hoje em dia, são a execução de uma camada asfáltica adicional sobre o revestimento existente e a fresagem com recomposição do revestimento asfáltico. Uma outra alternativa para a recuperação dos pavimentos deteriorados é a técnica de reciclagem, que consiste no reaproveitamento dos materiais existentes no pavimento.

A reciclagem dos pavimentos vem sendo cada vez mais utilizada em vários países. O aumento de sua utilização se deve às vantagens que este tipo de solução proporciona, como o aproveitamento dos agregados e ligantes do pavimento deteriorado, conservação da geometria e da espessura do pavimento existente, possibilidade de redução de custos, preservação do meio ambiente e redução do consumo de energia.

Outro motivo para o uso da reciclagem é o conjunto de restrições impostas por legislações de controle ambiental que estão sendo implantadas progressivamente em todos os países do mundo, que estabelecem a redução da deposição de resíduos, emissão de gases poluentes e exploração de fontes de materiais não renováveis.

Fazendo-se uma análise global quanto ao emprego da técnica de reciclagem de pavimentos observa-se que a reciclagem nos Estados Unidos e Europa, conforme dados publicados por Holtz e Eighmy (2000), resulta em aproveitamento de elevada porcentagem de material recuperado dos pavimentos com revestimento asfáltico. A Tabela 1 apresenta valores aproximados de produção e reciclagem destes materiais.

Tabela 1: Materiais recuperados dos pavimentos com revestimento asfáltico

País	Produção (milhões de toneladas)	Reciclagem (%)
EUA	41	80
Suécia	0,88	95
Alemanha	13,2	55
Dinamarca	0,53	100
Holanda	0,12	100

Fonte: Holtz e Eighmy (2000)

Os processos de reciclagem dos pavimentos podem ser executados a frio ou a quente, *in situ* ou em usina. A reciclagem pode ser realizada somente no revestimento asfáltico ou atingir profundidades maiores do pavimento. A escolha da técnica a ser empregada depende da análise de diversos fatores como capacidade estrutural, condição de superfície do pavimento, disponibilidade de equipamento, avaliação de custo, propósito de aplicação e condições ambientais, entre outros.

Para garantir eficiência ao processo e qualidade ao material reciclado, a adoção de equipamentos adequados é de grande importância. O crescente interesse em reciclagem de pavimentos tem motivado os fabricantes a produzir equipamentos projetados especificamente para essa técnica. No Brasil, empresas da área rodoviária já estão adquirindo esses equipamentos.

Na reciclagem dos pavimentos o uso de materiais adicionais pode ser necessário, tais como agregado virgem, cimento asfáltico de petróleo (CAP), cimento Portland, emulsões asfálticas, espuma de asfalto e agentes rejuvenescedores. Os projetos de misturas asfálticas recicladas têm a função de definir a quantidade e qual o material mais adequado para a composição da mistura reciclada, de acordo com o tipo de reciclagem a ser adotado.

A modalidade de reciclagem a frio *in situ* tem sido internacionalmente utilizada e considerada como uma das técnicas de reabilitação que vem se expandindo rapidamente desde 1980. Destaca-se nesta técnica o uso de asfalto como agente de reciclagem, aplicado em forma de emulsão ou espuma. Porém, falta ainda, para esta tecnologia, uma padronização que contemple métodos e técnicas apropriadas para a melhor aplicação das misturas asfálticas recicladas a frio. Encontra-se em desenvolvimento um projeto europeu denominado *Superior Cold Recycling* (SCORE), baseado nos benefícios da utilização de emulsão asfáltica e espuma de asfalto. O objetivo do projeto é divulgar a reciclagem a frio *in situ* de pavimentos, através

do desenvolvimento de novos processos e produtos e da otimização das técnicas existentes com melhor seleção dos materiais e métodos de aplicação (MODERN ASPHALTS, 2003).

A reciclagem de pavimentos já foi empregada em alguns trechos de rodovias brasileiras, contudo existem poucos estudos sobre o tema. Essa carência de estudos se verifica tanto na parte de projeto das misturas recicladas como no controle tecnológico e avaliação do desempenho do pavimento ao longo do tempo. Com a finalidade de contribuir para a ampliação dos conhecimentos na área de reciclagem de pavimentos, o presente trabalho propõe um estudo laboratorial de misturas asfálticas recicladas a frio.

A escolha da técnica de reciclagem a frio de revestimentos asfálticos deve-se ao fato de existir grande possibilidade de aplicação deste tipo de reciclagem no Brasil, onde diversas rodovias apresentam espessas camadas asfálticas devido a sucessivos recapeamentos, viabilizando a reciclagem somente do revestimento asfáltico. Além disso, a evolução dos equipamentos específicos para este tipo de reciclagem garante melhor controle de qualidade da execução, com possibilidade de aproveitamento de 100 % do material fresado.

O objetivo geral deste trabalho é verificar, através de estudos de laboratório, o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a frio produzidas com material fresado proveniente de revestimentos asfálticos envelhecidos, para fins de utilização como camada de base na restauração de pavimentos.

A presente dissertação tem como objetivo específico testar experimentalmente em laboratório as propriedades mecânicas, medidas através dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração de misturas asfálticas recicladas a frio. As misturas serão estudadas com material fresado proveniente de revestimentos asfálticos envelhecidos e com dois tipos de ligantes. Ainda nesse contexto, objetiva-se avaliar o comportamento dessas misturas quando um agregado novo é adicionado.

O trabalho foi dividido em cinco capítulos. Este primeiro capítulo contém a introdução, que aborda a justificativa do tema estudado e os objetivos da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os tipos de reciclagem de pavimentos existentes e os agentes de reciclagem empregados no estudo. Contém ainda uma revisão sobre alguns métodos de projeto de misturas asfálticas recicladas a frio e são feitas algumas

considerações sobre a amostragem do material para projeto. No final, contém dados de projetos e de estudos de laboratório de misturas asfálticas recicladas a frio.

A caracterização e análise dos materiais utilizados na pesquisa, juntamente com a descrição dos ensaios e procedimentos realizados em laboratório para o estudo das misturas asfálticas recicladas são apresentadas no capítulo 3.

O capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa que avaliou o comportamento mecânico de quatro misturas asfálticas recicladas a frio, com as respectivas análises.

As conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 5.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são feitas algumas considerações iniciais sobre a reciclagem de pavimentos e descreve-se um breve histórico sobre o assunto. Após, são apresentados os principais tipos de reciclagem dos pavimentos flexíveis e são enfocados os tipos de agente de reciclagem a frio utilizados na pesquisa. Alguns tópicos sobre amostragem para projeto são abordados, assim como os principais métodos de projeto que vêm sendo utilizados para misturas asfálticas recicladas a frio. Por último, apresentam-se alguns dados de projetos e de estudos de laboratório realizados com este tipo de mistura.

2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A reciclagem de pavimentos consiste na reutilização, após processamento, dos materiais existentes no pavimento deteriorado. Nesta técnica, toda ou parte da estrutura do pavimento existente é reaproveitada para a construção de uma camada, incorporando ou não novos materiais.

A aplicação da reciclagem de pavimentos é um procedimento que visa diminuir o consumo de materiais virgens, reduzindo, desta forma, a exploração de fontes de materiais pétreos. Na reciclagem de revestimentos asfálticos, pode-se aproveitar o ligante envelhecido adicionando agentes rejuvenescedores, reduzindo o consumo de asfalto. Esses aspectos conferem à técnica um componente ecológico muito relevante.

Conforme Asphalt Institute (1983), mesmo em locais de ocorrência abundante de agregados pétreos, a reciclagem é importante, uma vez que pode reduzir o custo devido ao transporte de materiais. Outro fator que torna a reciclagem atrativa é quando não se dispõe de local adequado para depositar o material removido do pavimento deteriorado, principalmente, devido a restrições impostas pela legislação de proteção ambiental.

Segundo Kandhal e Mallick (1997), o reaproveitamento dos materiais existentes no pavimento para produzir um novo pavimento resulta em uma redução considerável de materiais, custo e energia. Ao mesmo tempo, a reciclagem do pavimento deteriorado também

contribui para solucionar problemas de disposição do material na pista, pois o reuso do material permite manter a geometria e a espessura do pavimento. Em alguns casos, a interrupção do tráfego é menor do que em outras técnicas de reabilitação. Assim, a técnica de reciclagem tem como vantagens específicas: redução de custos da construção, aproveitamento de agregados e ligantes, preservação da geometria existente, preservação do meio ambiente, economia de energia nas etapas de produção, transporte e extração da matéria-prima e também menor tempo de execução.

2.2 BREVE HISTÓRICO

A técnica de reciclagem de pavimentos iniciou nos Estados Unidos em 1915. Uma quantidade considerável de pavimentos foi reciclada até a década de 30, principalmente pavimentos urbanos. Após esta década, a quantidade de obras com aplicação da técnica de reciclagem foi sendo reduzida, devido ao aumento da oferta de asfalto no mercado, o que tornava a construção de um novo revestimento mais barata que a reciclagem do mesmo. (CASTRO, 2003; KANDHAL; MALLICK, 1997).

Na década de 70, com a falta de materiais asfálticos e com a crise econômica internacional, em decorrência da crise do petróleo, técnicos rodoviários internacionais, juntamente com organismos de fomento, começaram a dar ênfase ao reaproveitamento dos materiais existentes nos pavimentos deteriorados, através da técnica da reciclagem (BONFIM, 2000).

A reciclagem foi empregada pela primeira vez no Brasil, em 1960, pela Prefeitura Municipal da cidade do Rio de Janeiro, onde os revestimentos asfálticos das ruas eram removidos com a utilização de marteletes e transportados para serem remisturados em usina (CASTRO, 2003).

Já a primeira experiência de reciclagem em rodovias no Brasil foi em 1985, em um trecho de 100 km da rodovia Anhanguera, entre São Paulo e Campinas. Nesta ocasião foi executada a fresagem do revestimento e posterior reciclagem a quente em usina *drum mixer* (CAMPOS, 1987; MELLO; CAMERATO, 1995).

Ainda na década de 80, foi realizada pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), a reciclagem a quente *in situ*, na rodovia Presidente Dutra, em trechos localizados no estado do Rio de Janeiro e de São Paulo (DNER, 1996).

Alguns trechos experimentais utilizando reciclagem a frio em usina foram executados ainda na década de 80, na rodovia Anchieta, e na década de 90, na rodovia do Açúcar, pelo Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo. (PARANHOS; TUCHUMANTEL, 1992).

A reciclagem a frio *in situ* do revestimento asfáltico foi realizada pela primeira vez no Brasil pelo DNER, em 1993, na BR/393, estado do Rio de Janeiro, entre Além Paraíba e Sapucaia, com utilização de emulsão especial (PINTO *et al.*, 1994).

Também na década de 90 foi realizada a primeira obra de reciclagem *in situ* a frio em área urbana no país, localizada em um segmento predominantemente comercial da Via Anchieta (BONFIM; DOMINGUES, 1995).

A execução de vários outros trechos utilizando a técnica de reciclagem a frio *in situ* é citada por Wirtgen [2000?]. Estes trechos foram executados entre os anos de 1997 e 2000, utilizando diferentes tipos de agentes de reciclagem como pode-se exemplificar: espuma de asfalto e cimento (RS/040 - Viamão - Pinhal), cal (SP/160 - Rodovia dos Imigrantes), cimento (BR/116 - Rodovia Presidente Dutra) e emulsão rejuvenescedora (BR/381 - Rodovia Fernão Dias), entre outros.

Trechos mais recentes utilizando a reciclagem a frio *in situ* da camada de revestimento asfáltico foram executados no estado de São Paulo. Um deles inclui um segmento experimental em um trecho urbano da PLN/339, na cidade de Paulínea, executado em março de 2004, empregando emulsão especial (SUZUKI *et al.*, 2005).

Em dezembro de 2004, outro trecho experimental foi executado, na SP/147, entre Piracicaba e Limeira. Devido ao sucesso obtido, esta tecnologia foi escolhida para a restauração de 35 km desta rodovia. O equipamento utilizado na execução foi um trem de reciclagem capaz de fresar, peneirar, rebritar, dosar e misturar os componentes reciclados. Como agente de reciclagem empregou-se uma emulsão especialmente formulada para garantir coesão, rigidez inicial e elevada durabilidade, possibilitando a rápida abertura ao tráfego (LIBERATORI; CONSTANTINO; TUCHUMANTEL, 2005).

2.3 TIPOS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Existem, hoje, diversas técnicas de reciclagem. Serão descritas neste trabalho, de uma forma geral, as principais técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis. A reciclagem de pavimentos pode ser realizada a frio ou a quente, com processamento em usina ou *in situ*.

A primeira etapa da reciclagem consiste em fresar o pavimento existente na profundidade especificada em projeto. A fresagem proporciona o corte do pavimento, podendo ser realizada a quente ou a frio, resultando em partículas de dimensões finais dependentes da profundidade do corte, da velocidade do avanço da máquina, do sentido de rotação do cilindro fresador, da qualidade do material, do teor de asfalto, das condições do revestimento e das condições ambientais (BONFIM, 2000; DNER, 1998). A Figura 1 apresenta uma ilustração de fresagem a frio.

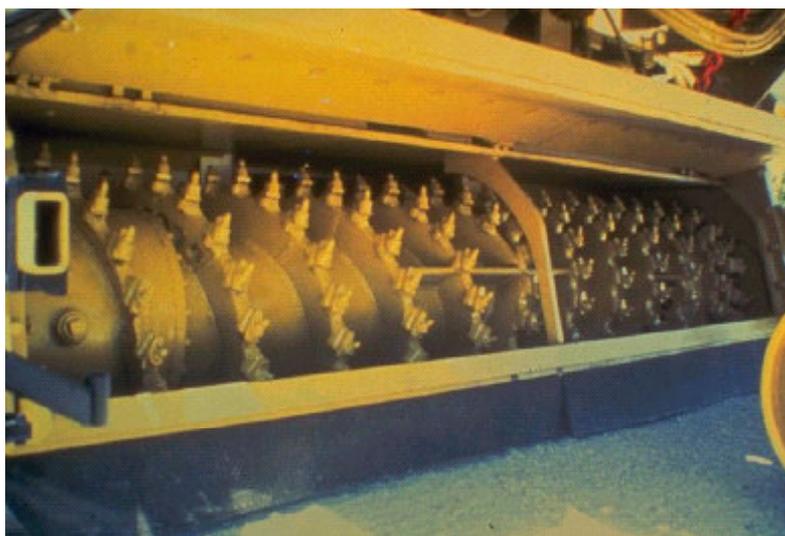


Figura 1: Equipamento para fresagem a frio

(Fonte: Kandhal e Mallick (1997))

O material fresado pode ser retirado do local para ser reciclado em usina ou pode ser reciclado no próprio local, tratando-se, respectivamente, de reciclagem em usina e reciclagem *in situ*. O pavimento reaproveitado pode ser processado a quente ou a frio.

2.3.1 Reciclagem a frio

A reciclagem a frio é definida como um processo em que o material removido do pavimento é combinado com ligante asfáltico novo e/ou agentes de reciclagem, agregado virgem (se necessário), produzindo misturas a frio no local ou em usina para serem utilizadas como camada de base (ASPHALT INSTITUTE, 1983). Sobre essa camada aplica-se um tratamento superficial ou uma mistura asfáltica como microrrevestimento asfáltico ou concreto asfáltico, com a função de proteger a camada reciclada dos danos causados pela água e da abrasão provocada pelo tráfego (KANDHAL; MALLICK, 1997). O tipo de tratamento que será dado à superfície da camada reciclada depende do tipo e da intensidade do tráfego projetado para a rodovia.

2.3.1.1 Reciclagem a frio em usina

A reciclagem em usina é utilizada quando existe material removido do pavimento estocado, quando por alguma razão o pavimento tem que ser removido da pista ou quando não se pode reciclar *in situ*. A Figura 2 mostra uma usina de reciclagem a frio.

A técnica de reciclagem a frio em usina consiste no processo de mistura do material removido do pavimento com ligante novo e/ou agente de reciclagem para produzir a frio misturas que sejam utilizadas como base. Agregados virgens podem ser utilizados na mistura reciclada, se necessários.

Segundo Kandhal e Mallick (1997) as usinas mais utilizadas para este tipo de reciclagem são as usinas de solo, podendo também ser empregadas as usinas gravimétricas e as usinas *drum mixer*. Pinto (2002) ainda cita a utilização de usinas móveis para produzir misturas recicladas a frio. Ressalta-se que o emprego de usinas de solos é muito grande em países europeus e a porcentagem de reaproveitamento do material fresado pode atingir cerca de 90% (BONFIM, 1999).



Figura 2: Reciclagem a frio em usina (Fonte: Wirtgen (2004))

2.3.1.2 Reciclagem a frio *in situ*

A reciclagem a frio *in situ* é definida como uma técnica em que os materiais existentes no pavimento são reutilizados no próprio local. Os materiais são misturados sem aplicação de aquecimento. A operação é realizada utilizando máquinas de reciclagem, as quais evoluíram de máquinas fresadoras e estabilizadoras de solo às atuais recicladoras. São máquinas especializadas e apresentam capacidade de reciclar uma camada espessa de pavimento numa simples passada.

Conforme Kandhal e Mallick (1997) e USACE (2005), a técnica de reciclagem a frio *in situ* pode ser desenvolvida de duas maneiras: parcial e total. Na reciclagem total, o revestimento asfáltico juntamente com a camada granular é reciclado, enquanto que na reciclagem parcial recicla-se somente o revestimento asfáltico.

2.3.1.2.1 Reciclagem do revestimento asfáltico (reciclagem parcial)

A reciclagem do revestimento asfáltico aplica-se em pavimentos deteriorados com defeitos localizados somente no revestimento asfáltico, não havendo problemas estruturais de base ou subleito (HALL *et al.*, 2001; O'LEARY; WILLIAMS, 1993). O propósito desta técnica é a eliminação de problemas superficiais tais como trincamento por fadiga, irregularidade superficial, desgaste e baixa resistência à derrapagem.

O procedimento consiste em fresar a camada asfáltica até uma certa profundidade sem afetar a base. O material removido é misturado com um agente de reciclagem que pode ser emulsão asfáltica, espuma de asfalto ou agente de reciclagem emulsionado, que complementa a quantidade de ligante da mistura, se necessário, possibilitando o reaproveitamento da mesma com as características definidas em projeto. Caso necessário, pode ser adicionado agregado virgem à mistura, que é espalhado na pista previamente. Após a operação de mistura dos materiais procede-se o espalhamento e a compactação da mistura reciclada.

A reciclagem da camada asfáltica, geralmente é realizada na profundidade de 75 a 100 mm, para produzir uma camada de base em rodovias com tráfego médio a baixo (HALL *et al.*, 2001; KANDHAL; MALLICK, 1997). Conforme Rogge *et al.* (1993) e USACE (2005), a técnica também pode ser empregada na profundidade de 50 a 100 mm. A Figura 3 mostra esquematicamente a reciclagem do revestimento asfáltico.

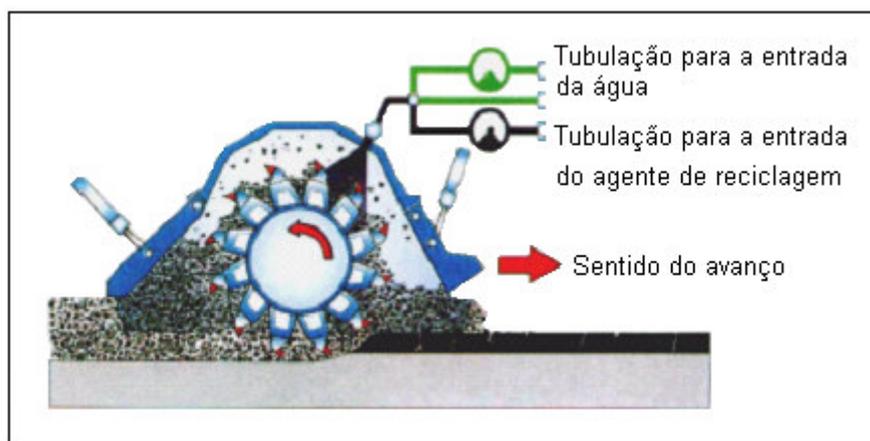


Figura 3: Reciclagem a frio *in situ* do revestimento asfáltico
(Fonte: Wirtgen (2004))

O processo pode ser realizado por uma unidade simples, que fresa e mistura o material, apresentada na Figura 4, ou por uma unidade múltipla de reciclagem, composta por máquinas diferentes para cada estágio incluindo fresagem, peneiramento, britagem e mistura (MUNCY, 1990; KANDHAL; MALLICK, 1997). A Figura 5 mostra uma unidade múltipla de reciclagem.

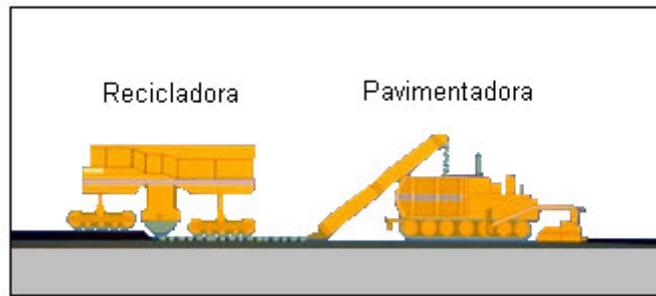


Figura 4: Unidade simples de reciclagem
(Fonte: Kandhal e Mallick (1997))

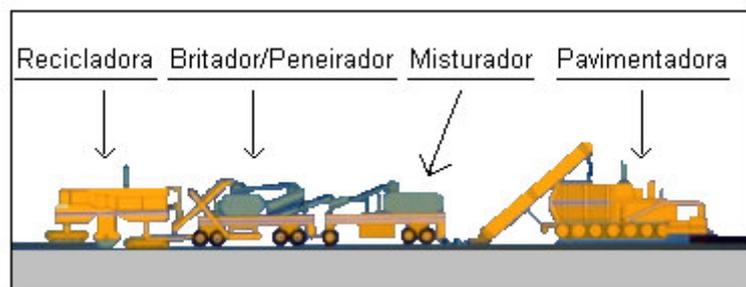


Figura 5: Unidade múltipla de reciclagem
(Fonte: Kandhal e Mallick (1997))

O processo de reciclagem de revestimentos asfálticos a frio *in situ* é composto por diversas operações:

- a) adição de agregado se necessário, sendo espalhado na pista antes da fresagem;
- b) fresagem do material existente;
- c) transformação do material fresado em um material homogêneo;
- d) adição do ligante asfáltico novo e/ou agente de reciclagem;
- e) mistura de todos os componentes;
- f) espalhamento da mistura;
- g) compactação da mistura;
- h) cura da mistura;
- i) aplicação da camada de proteção/rolamento.

A seleção da técnica de reciclagem de revestimentos asfálticos a frio *in situ*, como método de reabilitação de pavimentos, depende da avaliação de vários critérios. Rogge *et al.* (1993) sugerem alguns critérios a serem observados para a recomendação desta técnica. Estes são apresentados na Figura 6.

Não se recomenda quando houver:
problemas de subleito incompatibilidade ao volume de tráfego falta de adesividade excesso de ligante condições severas de frio e umidade espessuras de revestimento inferiores a 4 cm
Recomenda-se quando houver:
trincamento desgaste irregularidade superficial necessidade de camada de binder ou base no caso de recapeamento necessidade de reabilitação seletiva por faixa de rolamento falta de agregados virgens na região

Figura 6: Critérios para seleção da reciclagem de revestimentos asfálticos a frio *in situ* (Fonte: Rogge *et al.* (1993))

2.3.1.2.2 Reciclagem do revestimento asfáltico e camadas granulares (reciclagem total)

O objetivo deste tipo de reciclagem é obter uma base estabilizada. Este tratamento aplica-se em rodovias em que a base e o revestimento asfáltico apresentam problemas. A reciclagem atinge profundidades maiores, envolvendo o revestimento asfáltico e a base granular ou parte desta. Diferentes tipos de agentes de reciclagem podem ser utilizados, tais como emulsão asfáltica, espuma de asfalto, cal hidratada ou cimento Portland. Agregados novos também podem ser adicionados à mistura, se necessários.

Segundo Kandhal e Mallick (1997), este método de reciclagem é executado na profundidade de 100 a 300 mm. Geralmente tem sido realizado na profundidade máxima de 25 mm (WIRTGEN, 2004). A Figura 7 apresenta um esquema de reciclagem do revestimento asfáltico e camadas granulares.

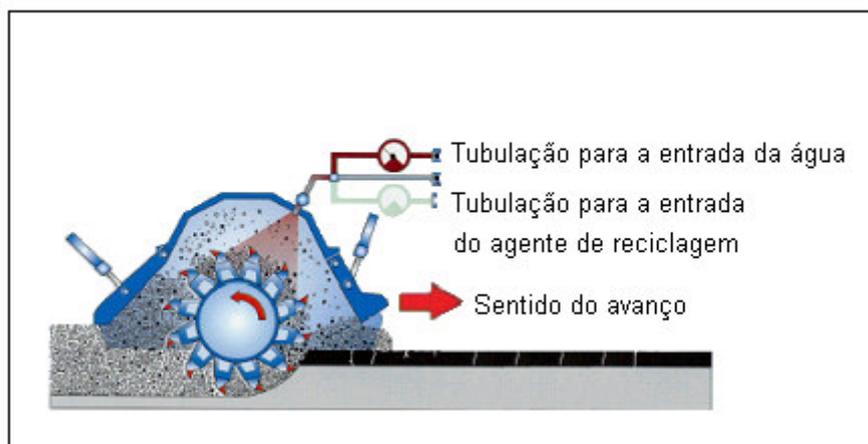


Figura 7: Reciclagem a frio *in situ* do revestimento asfáltico e camada granular (Fonte: Wirtgen (2004))

2.3.1.2.3 Vantagens da reciclagem a frio *in situ*

Algumas das vantagens da utilização da técnica de reciclagem a frio *in situ* são:

- a) aproveitamento total dos agregados pétreos existentes no pavimento, reduzindo a exploração de pedreiras e conferindo a esta técnica um componente ecológico muito importante. Nesse caso as rodovias tornam-se fontes de agregados;
- b) conservação de energia, já que não é necessário o aquecimento do asfalto e o agregado não requer secagem. Conforme relatado por Davidson, Blais e Croteau (2004), a energia consumida na produção da mistura reciclada a frio *in situ* é aproximadamente 20% da energia necessária para produzir novas misturas asfálticas a quente, considerando a mesma quantidade. Além disso, a emissão de gases é reduzida, trazendo benefícios ao meio ambiente;
- c) atenuação da reflexão das trincas. Conforme relatado por Huffman (1995), a reciclagem retarda o aparecimento das trincas da base. Segundo Davidson, Blais e Croteau (2004), as misturas recicladas a frio têm propriedades mecânicas que diferem significativamente das misturas asfálticas convencionais a quente. O elevado volume de vazios das misturas asfálticas recicladas a frio provocam uma atenuação na reflexão das trincas. Pinto *et al.* (1994) citam que a reconstrução da camada asfáltica através do processo de

reciclagem permite criar uma camada intermediária, com característica mecânica (módulo e resistência) inibidora do mecanismo de propagação de trincas do revestimento antigo para a camada de rolamento;

- d) aproveitamento do asfalto envelhecido na mistura;
- e) obtenção de uma camada reprocessada com características mecânicas mais homogêneas que um conjunto de recapeamentos sucessivos fraturados (MOMM; DOMINGUES, 1995);
- f) rapidez na execução do serviço, minimizando o transtorno causado aos usuários;
- g) preservação da geometria do pavimento. A técnica de reciclagem pode ser aplicada, se for o caso, em um único lado da pista e evita o desnível entre a pista e o acostamento. Também faz com que não haja aumento de cotas a cada recapeamento, o que provocaria problemas em viadutos (altura livre), pontes (sobrecarga), meio-fios e elementos de drenagem superficial;
- h) economia de recursos financeiros. A reciclagem de pavimentos pode proporcionar uma redução de custo de 40 % a 50 % em relação a métodos convencionais (KANDHAL; MALLICK, 1997; ROGGE *et al.*, 1993). Esta redução se deve, entre outros fatores, à eliminação do custo devido ao transporte de materiais e à redução do consumo de energia, pois o processo é realizado a frio.

2.3.2 Reciclagem a quente

A reciclagem de pavimentos a quente é definida como um método pelo qual o revestimento asfáltico fresado é misturado a quente com agregado virgem, asfalto e/ou agente rejuvenescedor e/ou agente de reciclagem para produzir uma mistura asfáltica reciclada a quente. O processo pode ser realizado em usina ou *in situ* (KANDHAL; MALLICK, 1997).

2.3.2.1 Reciclagem a quente em usina

Entende-se por reciclagem de pavimentos em usina a quente, o processo pelo qual os materiais provenientes de revestimentos deteriorados são misturados a quente em usina com agregados novos, ligantes asfálticos novos e/ou agentes rejuvenescedores e/ou agentes de reciclagem, em proporções adequadas. Este processo tem por objetivo produzir uma nova mistura asfáltica a quente que atenda aos requisitos de qualidade, resistência e durabilidade exigidos para a camada em que será utilizada (IBARRA, 2003).

Neste caso, o material é retirado do pavimento através de fresagem e transportado até a usina. A fresagem geralmente é realizada a frio e na profundidade definida em projeto. Neste processo o material fresado pode ser estocado e britado. Imediatamente após a produção da mistura em usina, a mesma é transportada até a pista, espalhada e compactada, utilizando os procedimentos convencionais.

A mistura reciclada pode ser produzida em usinas gravimétricas ou do tipo *drum mixer*. Segundo Kandhal e Mallick (1997), geralmente, 10 a 35 % do material removido do pavimento são utilizados para a composição da mistura reciclada nas usinas gravimétricas, sendo que em algumas situações utiliza-se até 50 %. Já para as usinas *drum mixer* esse aproveitamento do material removido é de 30 % a 50 %, na maioria dos casos, podendo atingir até 70 %. A limitação da quantidade de utilização do material está relacionada, principalmente, com problemas gerados no aquecimento da mistura (SHELL BITUMEN, 2003).

2.3.2.2 Reciclagem a quente *in situ*

O método de reciclagem a quente *in situ* consiste na fresagem do revestimento asfáltico e mistura a quente no local com ligante asfáltico novo e/ou agente rejuvenescedor e/ou agente de reciclagem, agregado e/ou mistura asfáltica (para correção da granulometria) e posterior distribuição da mistura reciclada. A compactação é realizada da maneira convencional. Conforme Kandhal e Mallick (1997) a espessura usual deste tipo de reciclagem é de 20 a 50 mm.

DNER (1998) cita dois tipos de procedimentos: o primeiro consiste na utilização de um equipamento móvel de mistura reciclada em que a fresagem do revestimento asfáltico é realizada a frio e a mistura é processada a quente. Caso seja necessária a adição de agregado, este deve ser espalhado sobre o pavimento, antes da fresagem. Já o segundo procedimento consiste no pré-aquecimento da superfície, seguido da utilização de um equipamento com unidades fresadoras conjugadas com câmaras de aquecimento, que efetuam a fresagem a quente do revestimento existente. Se houver necessidade, agregados novos ou mistura asfáltica nova podem ser adicionados no silo frontal da unidade recicladora. Após a mistura dos materiais é realizado o espalhamento e posterior compactação da mistura reciclada. A Figura 8 apresenta a seqüência de operação deste tipo de reciclagem.

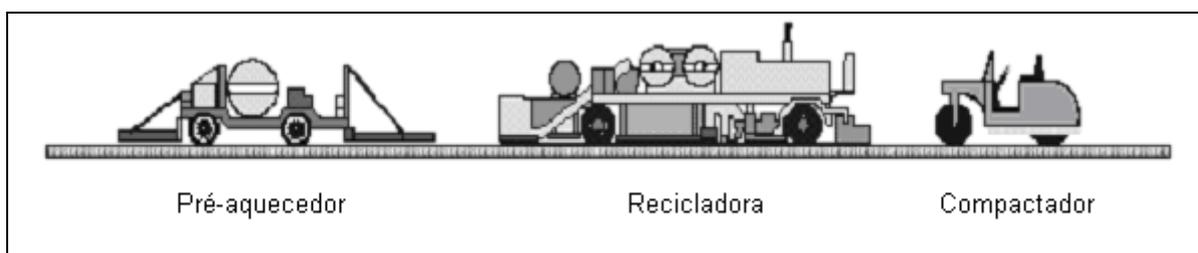


Figura 8: Esquema de operação da reciclagem a quente *in situ* com fresagem a quente (Fonte: Pinto (2002))

2.4 AGENTES DE RECICLAGEM A FRIO

Segundo Momm e Domingues (1995), os agentes de reciclagem a frio consistem em materiais que são adicionados à mistura reciclada com a função de conceder características físicas apropriadas à transformação da camada deteriorada em uma nova camada com qualidade adequada. Estes autores citam como principais agentes de reciclagem, que podem ser utilizados sozinhos ou conjuntamente, os que seguem:

- a) água, que possui a função de umedecer a mistura até alcançar a umidade ótima de compactação e/ou diluir a emulsão ou outros aditivos;
- b) emulsão asfáltica, podendo ser emulsão convencional ou emulsão especial (desenvolvida especificamente para cada mistura reciclada);

- c) agentes de reciclagem emulsionados, com a função de recompor o balanceamento dos componentes maltenos e asfaltenos do pavimento envelhecido;
- d) cimento Portland, que pode ter a função de acelerar a ruptura da emulsão, conferir resistência à mistura, melhorar a capacidade de suporte ou aumentar a rigidez da mistura reciclada;
- e) cal, com a função de melhorar a capacidade de suporte, aumentar a rigidez ou influenciar na ruptura da emulsão.

Outro agente de reciclagem que pode ser empregado nas misturas recicladas a frio é a espuma de asfalto (JENKINS, 2000; HODGKINSON; VISSER, 2004; WIRTGEN, 2004). Emulsões rejuvenescedoras modificadas por polímero também podem ser empregadas na técnica de reciclagem (DAVIDSON; BLAIS; CROTEAU, 2004; O'LEARY; WILLIAMS, 1993). Por serem tantos os agentes, optou-se por descrever neste item somente os agentes de reciclagem a frio que serão utilizados na pesquisa.

2.4.1 Emulsões asfálticas

Em termos práticos, as emulsões vieram atender à expectativa de aplicação do asfalto na construção em um processo desenvolvido inteiramente a frio (SENÇO, 1997).

A diversidade de produtos emulsificados permite a execução de praticamente todas as camadas asfálticas existentes na estrutura de um pavimento flexível. Sendo utilizados em estabilização com solos, pré-misturados a frio, reciclagem a frio de pavimentos, pintura de ligação, tratamentos superficiais, capas selantes, lama asfáltica, microrrevestimento asfáltico, areia-asfalto, etc.

As emulsões asfálticas representam uma alternativa para economia de energia, já que, na maioria das vezes, podem ser aplicadas sem necessidade de aquecimento e os agregados podem estar úmidos, dispensando o gasto com combustíveis para a secagem dos mesmos. O transporte e armazenamento também ficam facilitados, pois requerem instalações simples, não

necessitando de aquecimento. Dessa maneira, as emulsões asfálticas não geram vapores tóxicos e poluentes, representando um produto ecologicamente correto (ABEDA, 2001).

As emulsões asfálticas são constituídas de pequenos glóbulos de CAP, suspensos em água contendo agente emulsificante (LEITE, 1999). Apresentam coloração marrom e possuem consistência líquida. Após a ruptura prevalece a cor preta (IBP, 1999).

A produção das emulsões é feita através de processo mecânico utilizando equipamentos de alta capacidade de cisalhamento (moinhos coloidais) para promover a moagem do cimento asfáltico em pequenas partículas variando de 0,001 a 0,020 mm de diâmetro. Geralmente, no processo de emulsificação, o asfalto é aquecido a uma temperatura de 140 °C a 145 °C, com a fase água variando de 50 °C a 60 °C, já contendo o agente emulsificante para evitar a aglomeração dos glóbulos de asfalto (ABEDA, 2001).

Os agentes emulsificantes têm como objetivo favorecer a dispersão da fase asfáltica na fase aquosa e revestir os glóbulos de asfalto com uma película protetora, mantendo-os em suspensão (DNER, 1996). Como descrito por Senço (1997), os agentes emulsificantes podem ser do tipo ionizáveis, conferindo às emulsões cargas positivas ou negativas, correspondendo às emulsões catiônicas e aniônicas, respectivamente, ou do tipo não ionizáveis, emulsões eletricamente neutras. As proporções de agente emulsificante e ligante asfáltico que compõem a emulsão são da ordem de 0,2 % a 1,0 %, com no máximo 2,0 %, em peso, de emulsificante e em torno de 60 % a 70 % de asfalto, sendo o restante constituído pela fase aquosa.

Conforme descrito pelo Asphalt Institute (1989b), as emulsões devem permanecer suficientemente fluidas para sua adequada aplicação. Os glóbulos de asfalto são mantidos separados pelo agente emulsificante até que a emulsão se deposite nas partículas de agregados causando a ruptura da emulsão. Para que o asfalto desempenhe a sua função final de cimentação e impermeabilização, a fase asfalto deve separar-se da fase água. Isto ocorre através da neutralização das cargas eletrostáticas e da evaporação da água, que podem acontecer de forma separada ou concomitantemente. As partículas de asfalto se unem (processo de coalescência) produzindo uma película contínua de asfalto no agregado. O tempo para que haja a coalescência dos glóbulos de asfalto, denomina-se tempo de ruptura.

A velocidade de ruptura depende do tipo de emulsão, da reatividade (superfície específica e teor de umidade dos agregados), da temperatura ambiente e da temperatura dos materiais (ABEDA, 2001).

As emulsões catiônicas podem ser de ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL). Dependendo da quantidade de cimento asfáltico envolvido elas podem ser classificadas de 1C e 2C, onde a letra C indica emulsão do tipo catiônica e os números 1 e 2 estão associados à viscosidade relativa e à quantidade de cimento asfáltico empregado na fabricação. Segundo Asphalt Institute (1989b) as características de ruptura dependem muito da quantidade e das propriedades do agente emulsificante e das proporções de água e asfalto.

Nas emulsões de ruptura rápida, a ruptura ocorre imediatamente ou logo após o contato com os agregados, enquanto que nas emulsões de ruptura média, o tempo de ruptura é um pouco maior, permitindo que sejam utilizadas em misturas de agregados, porém praticamente isentos de material fino (pó de pedra). Já as emulsões de ruptura lenta, podem ser misturadas com agregados que contêm material fino, pois demoram mais tempo para a ruptura (ABEDA, 2001).

Segundo DNER (1996), as emulsões catiônicas apresentam boa adesividade aos agregados com cargas elétricas superficiais eletronegativas, tais como os arenitos e os granitos (elevadas porcentagens de sílica). As aniônicas têm boa adesividade aos agregados do tipo eletropositivo, ou seja, de origem calcária.

As emulsões catiônicas possuem melhor desempenho no que se refere a sua compatibilidade com a maioria dos agregados minerais (SHELL BITUMEN, 2003). Conforme Santana (1993), as emulsões catiônicas são as mais utilizadas no Brasil, não só porque aqui predominam os agregados eletronegativos (quartzito, areias quartzosas, granito, gnaisse, arenito, entre outros), mas também porque estas emulsões apresentam boa adesividade com agregados eletropositivos (basalto, calcário, diabásio, etc).

As emulsões de ruptura média e lenta têm sido utilizadas na técnica de reciclagem, além de emulsões especiais. As emulsões de ruptura lenta possuem a desvantagem do tempo de ruptura ser maior do que para as emulsões de ruptura média. Porém, emulsões de ruptura média podem conter solvente, este pode interferir nas propriedades de envolvimento das partículas do material fresado e no desempenho final da emulsão (SALOMON; NEWCOMB, 2000).

2.4.2 Agentes de reciclagem emulsionados

Os agentes de reciclagem emulsionados (ARE) são emulsões fabricadas especialmente como agentes de reciclagem em misturas asfálticas recicladas a frio e são classificados em ARE-1, ARE-5, ARE-25, ARE-75, ARE-250 e ARE-500. Os agentes de reciclagem emulsionados também são conhecidos por emulsões de maltenos, emulsões para reciclagem a frio e emulsões rejuvenescedoras.

A escolha do agente de reciclagem emulsionado mais indicado depende da consistência do ligante asfáltico recuperado do pavimento envelhecido, da quantidade de asfalto envelhecido, da utilização de agregados novos na mistura e de outras necessidades de projeto (ASTM D 5505, 2002).

Os agentes de reciclagem emulsionados são fabricados a partir dos agentes de reciclagem para misturas asfálticas recicladas a quente (AR). Este produto consiste de uma solução de maltenos obtida do resíduo asfáltico. Segundo Tuchumantel (1998), a difusão ou dispersão do agente rejuvenescedor (solução de maltenos) no asfalto é um processo físico que depende da temperatura, da agitação e dos trabalhos mecânicos adicionais. Muncy (1990) e DNER (1998) relatam que estes agentes são hidrocarbonetos especialmente refinados, possuindo em sua composição química uma alta fração de maltenos, que é a fração que se perde no processo de envelhecimento do asfalto. O agente rejuvenescedor promove um novo equilíbrio às frações de maltenos, levando o asfalto a readquirir as propriedades de um novo e durável cimento asfáltico.

Na confecção do agente de reciclagem emulsionado, primeiramente mistura-se uma determinada quantidade de AR com uma determinada quantidade de cimento asfáltico de petróleo (CAP), depois essa solução é emulsionada nos moinhos, com proporções variáveis de asfalto e água. A título de exemplo, uma proporção interessante a ser emulsionada pode ser de 60 % de solução (AR+CAP) com 40 % de água/emulsificantes para controle de mistura, ruptura e cura. A proporção adequada para emulsificação de um ARE dependerá das características do material a reciclar bem como de outras características, inclusive concernentes ao próprio ligante asfáltico base (GRECA ASFALTOS, 2003).

As especificações para agentes de reciclagem emulsionados são normalmente baseadas nas especificações para agentes de reciclagem a quente com ensaios adicionais que são idênticos

ou similares àqueles previstos para emulsões asfálticas convencionais (KANDHAL; MALLICK, 1997). A especificação brasileira para os agentes de reciclagem emulsionados, encontra-se ainda em fase de estudo. A Tabela 2 apresenta a proposta de especificação feita pela Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP, 1999). Mesmo sem especificação definida, os agentes de reciclagem emulsionados são de uso corrente em muitas obras de reciclagem no país.

Tabela 2: Proposta de especificação para os agentes de reciclagem emulsionados

Características	Unids.	Métodos		Especificações					
		ABNT	ASTM	ARE-1	ARE-5	ARE-25	ARE-75	ARE-250	ARE-500
Ensaio sobre a emulsão:									
a. Viscosidade Saybolt Furol, SSF, a 25 °C	s	MB 581	D 88	70 máx.	70 máx.	70 máx.	70 máx.	70 máx.	70 máx.
b. Sedimentação	% v	NBR 6570	D 244	5 máx.	5 máx.	5 máx.	5 máx.	5 máx.	5 máx.
c. Peneiração 0,84 mm	% p	MB 609	D 244	0,1 máx.	0,1 máx.	0,1 máx.	0,1 máx.	0,1 máx.	0,1 máx.
d. Carga da partícula		NBR 6567	D 244	NA	+	NA	NA	NA	NA
e. Destilação:									
solvente destilado	% v	NBR 6568	D 244	nula	nula	nula	nula	nula	nula
resíduo mínimo	% p			60 mín.	60 mín.	60 mín.	60 mín.	60 mín.	60 mín.
Ensaio sobre o resíduo:									
a Viscosidade cinemática a 60 °C	cSt	MB 826	D 2171 ou D 2170	50 - 75	176 - 900	901- 4500	4501- 12500	12501- 37500	37501- 60000
b. Teor de saturados	% p		D 2007	30 máx.	30 máx.	30 máx.	30 máx.	30 máx.	30 máx.
c. Efeito do calor e do ar a 163 °C		MB 425	D 1754						
razão de viscosidade			D 2872	4	4	4	4	4	4
variação de massa	% p			4 máx.	4 máx.	3 máx.	3 máx.	3 máx.	3 máx.

Nota: NA: Não Aplicável

Fonte: IBP (1999)

2.4.3 Efeitos do agente de reciclagem a frio na mistura asfáltica reciclada

Segundo Kandhal e Mallick (1997), os agentes de reciclagem que mais têm sido utilizados são a emulsão asfáltica e o agente de reciclagem emulsionado, porque são líquidos à temperatura ambiente, ficam dispersos na mistura e não causam maiores problemas de poluição. Os estabilizantes químicos como cimento, cinza volante ou cal têm sido utilizados combinados com emulsão asfáltica.

A espuma de asfalto tem sido utilizada mais efetivamente com efeito de dispersão do que ligação. Conforme descrito por Wirtgen (2004), a espuma de asfalto envolve as partículas finas que agem como uma argamassa flexível entre as partículas maiores.

Segundo Rogge *et al.* (1993) e Sherocman (1983), existem duas teorias a serem observadas para as misturas asfálticas recicladas a frio:

- a) considerar o material fresado como um “agregado negro”, composto de agregado e asfalto envelhecido, e projetar a mistura da maneira convencional, determinando o teor de asfalto para envolver essas partículas;
- b) avaliar as características físicas e químicas do asfalto envelhecido e adicionar um agente rejuvenescedor ou outro tipo de ligante asfáltico que restaurem as condições originais do asfalto. Admitindo que todo o asfalto envelhecido é capaz de ser recuperado, formando um novo ligante.

Além disso, alguns estados americanos concluíram que a combinação das duas teorias é o que normalmente ocorre, denominando-a “teoria efetiva do asfalto”. Com base nesta teoria, diz-se que uma porcentagem do asfalto envelhecido amolece e se combina com a emulsão adicionada formando uma porção na mistura chamada de asfalto efetivo. A porcentagem de asfalto que é recuperada está diretamente relacionada à rigidez do asfalto envelhecido e asfalto novo, à granulometria e porcentagem de asfalto do material fresado (ROGGE, 1993; SHEROCMAN, 1983).

Kandhal e Mallick (1997) abordam que o teor de asfalto efetivo definirá o desempenho da mistura, antes do teor total de asfalto. Uma maneira de determinação da quantidade necessária de ligante asfáltico seria através da análise da viscosidade ou penetração, visando obter valores típicos desses parâmetros para a mistura do ligante adicionado com o ligante envelhecido. Porém deve-se considerar que as reações que ocorrem entre os dois ligantes não ocorrem simultaneamente em toda a mistura e dependem das propriedades de cada ligante e dos processos de mistura, compactação, tráfego e condições climáticas. Por isso, os ensaios que determinam as propriedades mecânicas da mistura reciclada parecem ser mais adequados para selecionar o tipo e a quantidade do agente de reciclagem.

Ressalta-se ainda que as propriedades mecânicas da mistura, como a estabilidade, sofrem alteração com a perda de umidade e de voláteis. Portanto, é mais importante determinar as propriedades mecânicas da mistura reciclada com ligantes emulsionados antes e depois da cura do que simplesmente determinar a consistência do ligante (LIDA, 1980 *apud* KANDHAL; MALLICK, 1997). Fonseca (2002) relata que com o processo de cura da mistura

reciclada com emulsão, a água vai sendo eliminada, provocando o aumento da coesão. Juntamente com isso, a densidade da mistura aumenta com a ação do tráfego.

Davidson, Blais e Croteau (2004) relatam observações do efeito do ligante efetivo, as quais indicam que o desempenho mecânico das misturas recicladas melhora durante os primeiros meses de serviço, provavelmente isso representa o tempo que o asfalto novo está em processo de mistura com o asfalto envelhecido.

A eficiência do rejuvenescimento depende de vários fatores, mas principalmente das condições climáticas. Um ligante asfáltico rico em solvente, com boa capacidade de cobertura de misturas com mais agregado miúdo, em meses quentes de verão, origina um novo ligante efetivo mais rapidamente do que um ligante com menos solvente, com capacidade mínima de cobertura de misturas com mais agregado graúdo, em meses frios de inverno (DAVIDSON; BLAIS; CROTEAU, 2004).

Segundo Davidson, Blais e Croteau (2004), quando se utiliza agente de reciclagem emulsionado, o asfalto adicionado proporciona coesão à mistura reciclada, enquanto que o óleo malteno restaura as características do ligante envelhecido.

Talvez o termo rejuvenescimento, no sentido de restauração das características originais do asfalto não seja apropriado para reciclagem a frio. Segundo Tuchumantel (1998), o uso de uma emulsão estável de maltenos tem a vantagem de proporcionar a distribuição uniforme da fase óleo, antes de ser absorvida e combinada com o asfalto antigo, porém não causa a reconstituição de suas características originais. Kandhal e Mallick (1997) relatam que a contribuição do agente de reciclagem no asfalto envelhecido não está totalmente compreendida.

Motta, Pinto e Guarçoni (2002) colocam que para os casos de misturas recicladas a frio tem-se dúvidas se há uma verdadeira recuperação das características do ligante, pelo menos nos primeiros tempos após a execução da mistura reciclada.

Segundo Olsson, Lillbroando e Redelius (1999), não se consegue rejuvenescer o ligante a frio. Eles relatam que a incorporação de um material com o grau de enrijecimento compatível ao do material fresado seria melhor.

Fonseca (2002) cita que o material fresado possui agregados que já estão envolvidos pelo asfalto envelhecido, fazendo com que a absorção superficial destes esteja consolidada e, portanto, a afinidade seja maior com o novo ligante.

O comportamento do asfalto envelhecido com o asfalto novo adicionado nas misturas asfálticas a frio está sendo estudado através do projeto SCORE na Universidade de Grenoble, na França. Os estudos também contemplam como diferentes materiais reagem com o asfalto envelhecido (MODERN ASPHALTS, 2003).

2.5 AMOSTRAGEM PARA PROJETO DE MISTURA RECICLADA A FRIO

Para a realização do projeto da mistura reciclada, assim como para qualquer outro projeto de misturas, a coleta de amostras é de fundamental importância para a representatividade dos ensaios. Dependendo da forma de disposição do material a ser reciclado, a amostragem pode ser realizada, principalmente em dois locais, na pista ou nas pilhas de estocagem.

2.5.1 Amostragem na pista

Para realizar uma amostragem representativa na pista pode ser necessária a divisão da rodovia em diferentes segmentos homogêneos, que deverão ser analisados separadamente. As determinações dos segmentos dependem da condição do estado da superfície, que pode ser determinada visualmente, e do histórico do pavimento. O histórico do pavimento deve informar a espessura das camadas constituintes, tipo de revestimento aplicado e serviços de manutenção executados. Se os resultados das análises das amostras de cada segmento apresentarem diferença significativa podem ser necessários projetos específicos para cada segmento (ASPHALT INSTITUTE, 1983; TRB, 2001).

Conforme Asphalt Institute (1983), os locais para amostragem devem ser selecionados de forma aleatória e devem ser extraídas no mínimo cinco amostras por quilômetro de rodovia ou uma por quadra, no caso de vias urbanas. Em cada local de amostragem, a espessura de cada camada deve ser registrada. Já DNER (1998) relata que o número de amostras deve ser representativo da variação dos materiais do pavimento e recomenda que os segmentos

homogêneos da camada a ser reciclada tenham no máximo 2 km de extensão. Essa extensão pode ser maior ou menor dependendo do estado da superfície e da inspeção visual dos tipos de misturas existentes no segmento.

O processo de fresagem pode alterar a granulometria da mistura existente, por isso indica-se a obtenção da amostra de campo através do equipamento que será utilizado na obra, dessa maneira assegura-se a obtenção de uma amostra mais representativa. Entretanto, isso não é sempre possível, pois a fresagem é realizada em toda a largura da faixa de tráfego, resultando em uma grande quantidade de material fresado a ser removido da pista e conseqüentemente em uma grande remendo. Dessa forma, as amostras normalmente são extraídas por equipamentos de fresagem de pequenas dimensões ou serras de corte, até a profundidade que será executada a reciclagem. Posteriormente as amostras são levadas ao laboratório para, através da britagem, simular a granulometria do material obtido durante o processo de reciclagem e produzir as amostras para realização do projeto da mistura reciclada (KANDHAL; MALLICK, 1997; MOTTA; PINTO; GUARÇONI, 2002; ROGGE *et al.*, 2003; WIRTGEN, 2004).

Segundo Johnson [200-?], dependendo da temperatura e da velocidade da recicladora a quebra do material apresenta-se de maneira diferente, em função disso, as amostras devem ser britadas no laboratório em três diferentes graduações, normalmente fina, média e grossa. Estas graduações são utilizadas para desenvolver projetos no laboratório que depois serão comparadas com as granulometrias das amostras obtidas no campo, para identificar qual projeto é o mais indicado. Liberatori, Constantino e Tuchumantel (2005) descrevem a utilização deste procedimento na obra de reciclagem a frio de revestimento na rodovia SP/147.

Bonfim (2000) realizou um estudo do material fresado com relação às curvas granulométricas e constatou que a fresagem provoca um deslocamento das mesmas se comparadas às respectivas curvas originais. As curvas do material fresado, obtidas com a extração do asfalto, ou seja, sem os grumos, “deslocam-se para cima”, representando um material mais fino. Ocorre o inverso para as curvas granulométricas obtidas sem a extração do asfalto. Nestes casos, apesar da quebra de parte dos agregados, o material é analisado da forma como resulta da fresagem, com os grumos, o que faz com que a porcentagem de material passante em cada peneira seja menor. Para um melhor entendimento, segundo o mesmo autor, grumos são

pedaços de pavimento constituídos de um ou mais agregados, envoltos por material fino e cimento asfáltico de petróleo (CAP), produzidos no processo de fresagem.

2.5.2 Amostragem em pilhas de estocagem

A reciclagem pode ser feita utilizando materiais previamente fresados da pista e posteriormente estocados em pilhas. Segundo Asphalt Institute (1989b), a altura das pilhas do material fresado deve ser no máximo de três metros. O processo de amostragem do material fresado em pilhas é similar ao de amostragem de agregados, sendo importante obter amostras representativas. As amostras devem ser retiradas de vários locais da pilha para evitar a coleta de uma área que possa estar segregada e não ser representativa do material. Os materiais fresados geralmente segregam menos do que os agregados, pois o asfalto ajuda a manter as partículas unidas (TRB, 2001).

A diferença que pode ocorrer entre o agregado e o material fresado é que na pilha do material fresado pode existir uma crosta superficial, devido à exposição às intempéries, na profundidade de até aproximadamente 15 cm. Antes da obtenção das amostras esta crosta deve ser retirada, não sendo uma operação de difícil execução. As amostras devem ser coletadas, no mínimo de 10 locais da pilha, de forma aleatória (TRB, 2001).

Conforme Reclameid Asphalt Pavement User Guideline [1998?], as pilhas de estocagem do material fresado normalmente são deixadas descobertas porque a cobertura com lonas pode causar condensação e adicionar umidade ao material estocado. Outra alternativa é a disposição das pilhas em local aberto protegido com telhado, conforme Figura 9. Kandhal e Mallick (1997) relatam que pilhas cônicas têm sido mais indicadas ao invés de pilhas achatadas, pois possibilitam melhores condições de drenagem.



Figura 9: Estrutura para proteger e minimizar a umidade no material fresado (Fonte: Kandhal e Mallick (1997))

Para garantir um produto mais homogêneo deve-se estocar separadamente o material fresado, formando pilhas diferentes conforme a origem de cada material. Quando a quantidade de material fresado, proveniente de diferentes origens, for muito grande, e se tornar difícil manter pilhas separadas pela identificação da origem, têm-se a opção de realizar uma composição dos materiais. A composição é feita através das operações de mistura, britagem e peneiramento, reprocessando os materiais das pilhas de diferentes origens e produzindo um novo material (USER GUIDELINE RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT, [1998?]; TRB, 2001).

2.6 PROJETOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO

Os projetos das misturas asfálticas reciclada a frio têm como finalidade determinar a quantidade necessária de agente de reciclagem e/ou agregado virgem para assegurar que sejam atendidos os objetivos preconizados. Para isso, procede-se um estudo de laboratório, onde são preparadas amostras de misturas contendo diversas porcentagens de ligante asfáltico e determinam-se as suas propriedades através de diferentes ensaios. A mistura que apresentar os melhores resultados será a selecionada (DNER, 1998).

Não existe um método padrão aceito universalmente para projetos de misturas recicladas a frio. Contudo, existem procedimentos básicos que fazem parte da maioria dos métodos utilizados para projeto, quais sejam, coleta de amostras representativas, análise

granulométrica, determinação do teor de asfalto da mistura e determinação das propriedades do asfalto envelhecido. Uma das finalidades deste estágio inicial é de avaliar o material removido do pavimento, identificando as deficiências da mistura envelhecida e verificando a necessidade de adição de novos materiais à mistura (KANDHAL; MALLICK, 1997).

A adição de agregados novos à mistura pode ser feita para atender à faixa granulométrica utilizada, melhorar estruturalmente a mistura reciclada ou ainda, melhorar as propriedades como estabilidade, durabilidade ou trabalhabilidade. (ASPHALT INSTITUTE, 1983; KANDHAL; MALLICK, 1997; WIRTGEN, 2004). Nesta revisão da literatura são comentados métodos de projeto para misturas asfálticas recicladas a frio empregando emulsão ou agente de reciclagem emulsionado.

2.6.1 Métodos de projeto

Asphalt Institute (1983) propõe um método que consiste em determinar a granulometria da mistura (incluindo agregado virgem, se for necessário), já tendo sido determinado previamente a granulometria e o teor de asfalto do material fresado, escolher o tipo de ligante a ser adicionado, determinar a porcentagem de ligante em peso no total da mistura (utilizando uma fórmula empírica sugerida), estimar a porcentagem de ligante novo a ser adicionada na mistura e ajustá-la por tentativa no campo.

O método Marshall modificado, conforme relatado por Kandhal e Mallick (1997), é indicado pela *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA) e também pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) - Task Force N° 38, como descrevem Lee, Brayton e Huston (2002). Neste método, as amostras são ensaiadas com incrementos de 0,5 % de teor de emulsão e compactadas utilizando um compactador Marshall com 50 golpes por face. As amostras são curadas durante 6 horas à temperatura de 60 °C. Após a cura, determinam-se a massa específica aparente, a estabilidade (60 °C) e a fluência (60 °C) de cada amostra. O teor de projeto de emulsão asfáltica é definido pela massa específica aparente máxima. Numa segunda etapa determina-se a quantidade de água a ser adicionada.

Pinto *et al.* (1994) utilizaram uma metodologia própria, baseada fundamentalmente nos métodos utilizados, correntemente, na França (LCPC) e Argentina, para misturas similares. O

procedimento consiste em ensaiar o material fresado determinando a granulometria, o teor de asfalto e a penetração do material asfáltico após sua recuperação pela metodologia Abson (ASTM D 1856). Após a caracterização dos materiais, adicionam-se ao material fresado diversas proporções de emulsão convencional, tipo ruptura lenta e emulsões especiais, cada uma com diferentes teores de maltenos. Analisa-se a evolução da penetração para cada uma das emulsões empregadas na mistura, optando-se pelo tipo de emulsão que resulta no valor de penetração compatível ao valor desejado. A dosagem da mistura é realizada através do método Marshall modificado (argentino), onde a compactação da mistura é feita em moldes especiais, permitindo a drenagem da água da emulsão do corpo-de-prova. Além dos parâmetros Marshall, determina-se o módulo de resiliência da mistura.

Lee, Brayton e Huston (2002) sugerem um método de projeto de mistura reciclada a frio utilizando o compactador giratório Superpave. Este método é aplicável somente quando se utiliza emulsão asfáltica para compor a mistura reciclada proveniente da camada asfáltica. O método é composto de duas partes: primeiramente determina-se o teor de projeto de emulsão e após determina-se o teor de projeto de água na mistura, considerando o teor de emulsão já determinado. O teor de projeto corresponde ao valor máximo de massa específica aparente. Finalmente, moldam-se corpos-de-prova nos teores de projeto de água e emulsão e determina-se o efeito deletério da água de acordo com o método AASHTO T 283. Os corpos-de-prova após compactação são submetidos ao processo de cura em estufa a 60 °C por um período de 24 horas.

Mais recentemente, Liberatori, Constantino e Tuchumantel (2005) adotaram o método Marshall para mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica (DNER-ME 107/94) para definir o teor de projeto de emulsão. A emulsão utilizada foi especialmente desenvolvida para satisfazer as seguintes especificações: estabilidade Marshall a 40 °C (ASTM D 1559), estabilidade Marshall retida (baseado na AASHTO T 283, sem ciclo de congelamento), ensaio de desgaste (baseado na ISSA TB 100), módulo de resiliência e resistência à tração (ASTM D 4123).

Castro Neto e Bernucci (2000) propõem um método de dosagem para misturas asfálticas recicladas a quente. Segundo Motta, Pinto e Guarçoni (2002), há possibilidade de que este método seja adequado para misturas a frio, desde que se estabeleça um tempo e uma forma de cura acelerada em laboratório. Neste método é dispensável a etapa de recuperação do ligante do material fresado e são avaliadas as propriedades mecânicas da mistura reciclada. Sugere-se

a realização de ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência para diferentes porcentagens de agente de reciclagem, estando fixo o teor de ligante asfáltico ótimo da mistura reciclada. A porcentagem do agente de reciclagem é determinada em função dos valores requeridos das propriedades mecânicas da mistura reciclada definidas pelo projetista do pavimento.

Existem diferentes métodos sendo aplicados em vários países, porém não existem normas oficiais para dosagem de misturas recicladas a frio. As recomendações técnicas existentes para projetos de misturas recicladas a frio devem ser avaliadas em escala real e validadas através de resultados consistentes ao longo dos anos. Diante disso, pode-se considerar a reciclagem a frio como uma tecnologia em etapa experimental (ZEBALLOS; SAÉZ, 1999).

2.6.2 Dados de projetos e de estudos de laboratório

A realização de estudos em laboratório com o material fresado é a melhor forma de determinar a quantidade e o tipo de emulsão asfáltica a ser utilizada como agente de reciclagem. Primeiramente deve ser definida a composição granulométrica da mistura reciclada, considerando se há necessidade de acréscimo de agregado virgem. Asphalt Institute (1983) apresenta uma faixa granulométrica para misturas recicladas a frio, conforme apresentado no Tabela 3. Depois seleciona-se o ligante asfáltico a ser utilizado. A escolha da emulsão asfáltica é influenciada pela faixa granulométrica adotada. Para misturas de graduação aberta deve-se optar por uma emulsão de ruptura média. Já para as misturas densas, emulsões de ruptura lenta são as mais indicadas. Quando houver uma quantidade grande de finos as emulsões de ruptura lenta também devem ser utilizadas.

Tabela 3: Faixas granulométricas de misturas recicladas a frio (combinação do material asfáltico fresado e agregado virgem)

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passante, em massa						
		Graduação aberta			Graduação densa			
mm	pol. ou n°	A	B	C	D	E	F	G
35,5	1 1/2"	100			100			
25,0	1"	95-100	100		80-100			
19,0	3/4"		90-100					
12,5	1/2"	25-60		100		100	100	100
9,5	3/8"		20-55	85-100				
4,75	n° 4	0-10	0-10		25-85	75-100	75-100	75-100
2,36	n° 8	0-5	0-5					
1,18	n° 16			0-5				
0,30	n° 50							
0,15	n° 100						15-30	15-65
0,075	n° 200	0-2	0-2	0-2	3-15	0-12	5-12	12-20

Fonte: Asphalt Institute (1983)

Também podem ser utilizados agentes de reciclagem emulsionados. Segundo Kandhal e Mallick (1997), o agente de reciclagem ideal deve possuir as seguintes características: facilidade de mistura e recobrimento dos agregados, ser livre de solvente para que a cura ao ar não seja necessária e proporcionar rápida abertura ao tráfego. A escolha do agente de reciclagem depende das condições climáticas, pois estas influenciam na interação entre o agente de reciclagem e o asfalto envelhecido.

Kandhal e Mallick (1997) relatam que no processo de mistura da reciclagem a frio, uma quantidade de água pode ser requerida para facilitar o recobrimento dos agregados e a compactação da mistura. A água pode se apresentar como umidade natural do material asfáltico fresado, ou pode ser adicionada antes da colocação do agente de reciclagem, ou como um componente do agente de reciclagem (por exemplo: a diluição da emulsão asfáltica). A quantidade de água necessária para dispersar a emulsão asfáltica deve ser determinada nos procedimentos de laboratório, durante a realização do projeto da mistura reciclada. Segundo Davidson, Blais e Croteau (2004), a água durante a operação de reciclagem é muito importante, tendo duas funções: ajudar o ligante a envolver o material fresado e fornecer à mistura um lubrificante interno durante a compactação. Alerta-se, entretanto, que o excesso de água pode impedir a compactação e também fazer com que a emulsão envolva somente os finos. Uma quantidade menor de água, que permita o envolvimento adequado do agregado, é preferível, pois reduz o tempo de secagem.

A quantidade de emulsão asfáltica para reciclagem a frio do revestimento asfáltico geralmente varia de 0,5 % a 3,0 %, isto corresponde a 0,3 % a 2,0 % de cimento asfáltico residual das

emulsões asfálticas. A maioria das agências nos Estados Unidos prepara misturas contendo 1,0 %, 1,5 %, 2,0 %, 2,5 % e 3,0 % de emulsão. Quantidades maiores serão necessárias se agregados novos forem utilizados na mistura (KANDHAL; MALLICK, 1997).

Davidson, Blais e Croteau (2004) relatam que uma pequena quantidade do ligante novo é adicionada ao material fresado, porém o sucesso da reciclagem é altamente dependente do desempenho desse ligante na mistura reciclada. Os ligantes asfálticos novos podem ser emulsões rejuvenescedoras, emulsões asfálticas convencionais, emulsões modificadas por polímeros ou espuma de asfalto. Estes ligantes são utilizados com valores típicos de asfalto residual variando de 0,8 % a 1,6 %. Já Huffman (1995) menciona que teores de emulsão variam tipicamente de 1,0 % a 2,0 %, podendo ser mais elevados estes valores caso sejam utilizados agregados novos na mistura reciclada.

Salomon e Newcomb (2000) pesquisando diferentes tipos de material fresado concluíram que a quantidade de emulsão a ser adicionada na mistura reciclada é dependente do teor de asfalto do material fresado. Quanto maior o teor de asfalto envelhecido no material fresado, menor será a quantidade requerida de emulsão para a mistura reciclada. Neste estudo os teores de CAP do material fresado variaram de 7,5 % a 4,5 %, correspondendo aos teores de projeto de emulsão de 1,0 % a 3,0 %.

Nas tabelas a seguir constam os resultados de alguns projetos de misturas asfálticas recicladas a frio com emulsão asfáltica, utilizando 100 % do material fresado, para utilização em camada de base na restauração de pavimentos. A Tabela 4 apresenta as análises granulométricas do material fresado enquanto que a Tabela 5 contém os resultados de determinação do teor de asfalto envelhecido, ensaios de caracterização do asfalto envelhecido e características de projeto das misturas asfálticas recicladas.

Tabela 4: Análises granulométricas dos materiais fresados empregados em projetos de misturas asfálticas recicladas com emulsão

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passante, em massa							
		Via Anchieta Zona Urbana de São Paulo		BR/393 Além Paraíba Piracicaba		BR/381 Km 530 Carmópolis/MG		BR/101/SC Lote 3 em Barra Velha	SP/147 Piracicaba Limeira
mm	pol. ou n°	S/E	C/E	S/E	C/E	C/E	C/E	S/E	S/E
25,4	1"	100	100	100		100		GM	GG
19,1	3/4"	98	99	92	100	94,3		100	100
12,7	1/2"	93	95	83	97	85,5		93,4	88,1 78,7
9,5	3/8"	88	91	74	93	76,4		80,9	74,2 66,3
4,76	n° 4	64	74	55	80	62,2		55	54,6 44,2
2,38	n° 8								35,7 27,7
2,00	n° 10	37	55	44	68	46,3		36	
1,19	n° 16								20 15,7
0,59	n° 30								12,3 7
0,42	n° 40	9	30	15	32	25,9		17,2	
0,297	n° 50								6,9 5,7
0,177	n° 80	3	19	6	16	17,5		9,3	
0,149	n° 100								3 2,9
0,074	n° 200	1	10	2	8	8,3		5,2	1 0,9
Referência		Bonfim e Domingues (1995)		Pinto <i>et al.</i> (1994)		Ipiranga Asfaltos (1997)	Greca Asfaltos (2003)	Liberatori (2005)	

Nota: S/E: sem extração do ligante envelhecido. C/E: com extração do ligante envelhecido. GM: graduação média. GG: graduação grossa.

Tabela 5: Características de projeto de misturas asfálticas recicladas com emulsão

Característica	Via Anchieta Zona Urbana de São Paulo	BR/393 Além Paraíba Sapucaia	BR/381 Km 530 Carmópolis/MG	BR/101/SC Lote 3 em Barra Velha	SP/147 Piracicaba Limeira
Teor de asfalto envelhecido (%)		5,0	5,4	5,0	
Penetração do asfalto envelhecido (0,1 mm)	25	8	14	10	
Ponto de amolecimento do asfalto envelhecido (°C)	65,8		81	81,5	
Teor de emulsão asfáltica de projeto (%)	1,5	2,4	2,2	2,5	3,2
Teor de água (%)	1,9		1 a 3	2 a 4	
Estabilidade Marshall (kN)	8,20	7,40	5,50	5,35	8,30
Fluência (mm)	3,7		3,7	3,8	
Massa específica aparente (kN/m³)	23,40		20,45	20,25	21,16
Volume de vazios (%)		8,5	14	17	15
Módulo de resiliência (MPa)		500			1779
Resistência à tração (MPa)					0,18
Referência	Bonfim e Domingues (1995)	Pinto <i>et al.</i> (1994)	Ipiranga Asfaltos (1997)	Greca Asfaltos (2003)	Liberatori (2005)

É interessante relatar que após a execução, dois dos trechos anteriormente citados foram monitorados para verificação de desempenho ao longo do tempo. Com isso, transcorrido algum tempo, obtiveram-se novos resultados de ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração de amostras extraídas da pista.

Na BR/393, trecho Além Paraíba - Sapucaia, após oito anos da execução, os resultados de módulo de resiliência variaram de 2458 MPa a 4678 MPa e a resistência à tração apresentou valor mínimo de 0,46 MPa e valor máximo de 0,86 MPa. Estes valores foram obtidos de corpos-de-prova extraídos de um segmento onde não foi aplicada capa asfáltica sobre a mistura reciclada. Para as amostras extraídas da mistura reciclada abaixo da capa asfáltica, os valores foram de 2565 MPa e 2883 MPa para módulo de resiliência e de 0,58 MPa e 0,71 MPa para resistência à tração. Cabe colocar que, em 2002, foi realizada uma avaliação funcional do referido trecho, através da qual se constatou que o pavimento apresenta condição regular. Os principais defeitos foram afundamento de trilha de roda e algumas trincas refletidas, ocorrendo da mesma forma para a camada reciclada que está atuando como revestimento como para a camada reciclada em que foi aplicada uma capa asfáltica (MOTTA; PINTO; GUARÇONI, 2002).

Para o trecho Piracicaba - Limeira, localizado na SP/147, o serviço de reciclagem executado em dezembro de 2004, entre os Km 119+800 e Km 120+600, os módulos de resiliência apresentaram, respectivamente, os valores de 1745 MPa, 1397 MPa e 2402 MPa, em dezembro de 2004, em janeiro de 2005 e em fevereiro de 2005. Nestes mesmos períodos, foram determinados valores de resistência à tração, resultando em 0,21 MPa em dezembro de 2004, 0,26 MPa, em janeiro de 2005 e 0,42 MPa, em fevereiro de 2005. Ressalta-se que neste trecho foi aplicado, sobre a camada reciclada, somente 12 mm de microrrevestimento asfáltico (LIBERATORI, CONSTANTINO; TUCHUMANTEL, 2005).

Em outro trecho, ainda não citado, localizado na PLN/339, em Paulínea, foram extraídas amostras da pista após quatro meses da execução da reciclagem a frio. A reciclagem foi realizada no revestimento utilizando emulsão asfáltica. Os valores de módulo de resiliência obtidos foram de 3083 MPa e de resistência à tração, de 0,55 MPa. Neste caso, a camada reciclada não recebeu nenhum tratamento, sendo considerada como camada de rolamento (SUZUKI *et al.*, 2005).

Moreira (2005), em seu estudo laboratorial sobre comportamento mecânico de misturas asfálticas a frio com agregado fresado, obteve resultados em torno de 500 MPa para módulo de resiliência e 0,25 MPa para resistência à tração. Estes valores correspondem a uma mistura com granulometria similar a de um pré-misturado a frio, empregando 75 % de material fresado, 25 % de agregado virgem e 8,6 % de emulsão asfáltica RL-1C.

Também em estudo laboratorial de misturas asfálticas recicladas a frio, Silveira, Moreira e Soares (2002) obtiveram resultados de módulo de resiliência e resistência à tração. A mistura, com granulometria de pré-misturado a frio, composta de 30 % de material fresado e 70 % de agregado virgem, foi dosada utilizando dois tipos de ligantes: emulsão RL-1C e emulsão RL-1C modificada com AR-500. Para a mistura com a emulsão RL-1C, o teor de projeto de ligante foi de 6,5 %, resultando nos valores de 994 MPa para módulo de resiliência e de 0,31 MPa para resistência à tração. Já para a mistura com emulsão modificada, o teor de projeto foi de 5,6 %, apresentando módulo de resiliência de 1056 MPa e resistência à tração de 0,20 MPa. Neste presente estudo, o teor de projeto de ligante foi àquele referente à mistura de valor mais elevado de resistência à tração. Uma das conclusões do estudo foi que a emulsão convencional apresentou melhores resultados do que a emulsão modificada com agente rejuvenescedor.

Fonseca (2002), para as misturas asfálticas recicladas com emulsão asfáltica, cita valores de módulo de resiliência, depois de seis meses de execução, numa faixa entre 2000 MPa e 5000 MPa. Estes valores não excedem 1000 MPa logo após a execução. O mesmo autor relata ainda, como referência para o dimensionamento de pavimentos com este tipo de mistura reciclada, que usualmente se emprega o valor de módulo de resiliência de 2000 MPa.

Wirtgen (2004) cita alguns resultados de módulo de resiliência, resistência à tração e resistência à tração retida, para misturas recicladas a frio estabilizadas com asfalto, utilizadas como base. Quando se emprega uma mistura com 50 % de material fresado e 50 % de agregado, valores típicos de módulo de resiliência, para material testado em laboratório, são de 2500 MPa a 4000 MPa. Já para a resistência à tração, os valores ficam entre 0,25 MPa e 0,60 MPa. Ainda, pode-se verificar a suscetibilidade à umidade da mistura através da determinação da resistência retida, que implica em obter a relação entre os valores de resistência em amostras nas condições seca e saturada. As amostras na condição úmida são obtidas através de imersão em água a 25 °C por 24 horas. Quando se utiliza 50 % de material

fresado e 50 % de agregado, valores típicos de resistência à tração retida ficam em torno de 0,8 a 1,0.

Coforme consta em DNER-ES 405 (2000), as misturas asfálticas recicladas a frio *in situ* com espuma de asfalto, utilizadas como camada de base, devem apresentar o valor mínimo de 0,25 MPa, para a resistência à tração seca, e de 0,15 MPa para a resistência à tração após 24 horas de imersão em água a 25 °C. Castro (2003) relata que a condição em torno de 60 % para a relação das resistências nas condições seca e saturada, exigida nesta norma, é um exceção, sendo mais comum exigir um valor mínimo de 50 %.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados a relação de ensaios, a caracterização dos materiais e os métodos de ensaios empregados na pesquisa. Os ensaios de laboratório são descritos resumidamente, indicando as normas utilizadas para a realização dos mesmos onde constam detalhadamente os procedimentos específicos para cada ensaio. Os materiais caracterizados compreendem materiais pétreos, materiais asfálticos e misturas asfálticas. Também são apresentadas, neste capítulo, informações adicionais como coleta das amostras, definição dos materiais e procedimentos particulares adotados para alguns ensaios.

3.1 RELAÇÃO DE ENSAIOS

Os tipos e as quantidades de ensaios realizados no desenvolvimento da pesquisa estão apresentados, de forma sucinta, conforme Figura 10. Durante a pesquisa foram realizados ensaios em três diferentes materiais: agregados pétreos, ligantes e misturas asfálticas.

Ensaio de agregados	Nº de ensaios	Ensaio de ligantes	Nº de ensaios	Ensaio de misturas asfálticas	Nº de ensaios
Análise granulométrica	17	Viscosidade Saybolt Furol	02	Determinação do teor de asfalto por refluxo	07
Determinação do índice de lamelaridade	04	Peneiramento	02	Estabilidade e fluência Marshall	84
Determinação de partículas chatas e alongadas	03	Sedimentação	02	Massa específica aparente de misturas asfálticas	312
Determinação do desgaste por abrasão <i>Los Angeles</i>	02	Mistura com cimento	01	Massa específica máxima	56
Determinação do equivalente de areia	04	Carga da partícula	02	Resistência à tração por compressão diametral	144
Determinação da massa específica real, aparente e absorção - agregado graúdo	03	Resíduo por evaporação	04	Módulo de resiliência	84
Determinação da massa específica real - agregado miúdo	01	Resíduo por destilação	02		
		Penetração	04		
		Ponto de amolecimento anel e bola	04		
		Ductilidade	01		
		Recuperação do asfalto pelo método rotavapor	03		

Figura 10: Relação de ensaios

3.2 MATERIAIS PÉTREOS

Os materiais pétreos utilizados na pesquisa são de dois tipos, um deles é o material fresado dos revestimentos asfálticos envelhecidos e o outro é agregado miúdo virgem, que será adicionado na mistura asfáltica reciclada.

3.2.1 Material fresado

O material utilizado para a realização do estudo de laboratório é proveniente do depósito de material fresado dos revestimentos asfálticos das vias urbanas de Porto Alegre. Este depósito localiza-se junto à usina de asfalto da Prefeitura Municipal de Porto Alegre e está apresentado na Figura 11. Conforme informação obtida pelo engenheiro responsável pelo depósito, o material é resultante da fresagem realizada na espessura média de 50 mm de revestimento em concreto asfáltico e encontra-se depositado há aproximadamente cinco anos. Dau (2001) relata a observação de uma relativa constância nas propriedades do ligante envelhecido e principalmente na granulometria desse material fresado.

Cabe colocar que os pavimentos deteriorados das ruas das cidades são freqüentemente fresados, pois a geometria das vias deve ser mantida, assim como os poços de visita têm que ficar em nível com a superfície do pavimento (CASTRO, 2003). Disso resulta uma grande quantidade de material asfáltico removido e armazenado.



Figura 11: Depósito do material fresado

A coleta do material fresado para o estudo foi feita através de uma carregadeira, em três locais diferentes do depósito. A amostra foi colocada em um caminhão basculante e transportada até um local adequado onde foi depositada sobre lona, espalhada (para secagem ao ar), homogeneizada, quarteada e colocada em 50 sacos de aproximadamente 50 kg cada. Dessa forma produziu-se uma amostra para o estudo laboratorial, como mostrado na Figura 12.



Figura 12: Amostragem do material fresado

(a) amostra total do material fresado coletada no depósito

(b) secagem, homogeneização e quarteamento do material fresado

Observou-se que o material fresado é composto por partículas isoladas e por grumos, conforme apresentado na Figura 13.



Figura 13: Aspecto visual do material fresado

3.2.1.1 Caracterização do material fresado

A caracterização do material fresado foi feita através dos ensaios usualmente utilizados na caracterização de agregados virgens. A análise granulométrica foi realizada antes e após a extração do asfalto. Também foi determinada a quantidade de asfalto envelhecido existente no material fresado.

3.2.1.1.1 Análise granulométrica por peneiramento

Primeiramente foram realizados ensaios de granulometria por peneiramento, conforme método DAER/RS-EL 102/01, nas amostras do material fresado como coletado (natural) e após destorroamento manual.

O destorroamento foi realizado para conhecer o comportamento da amostra sob tal procedimento e tentar desfazer os grumos. Verificou-se que para destorroar a amostra fez-se necessário o aquecimento da mesma (aproximadamente 30 minutos em estufa a 110 °C). Sem

aquecimento os grãos não se separaram. Dessa forma, o grumo é tratado como um agregado novo (BONFIM E DOMINGUES, 1999). Foram escolhidas de forma aleatória as amostras a serem ensaiadas e os resultados são apresentados na Tabela 6.

Utilizando-se outras amostras, foram realizados ensaios de granulometria após a extração do ligante asfáltico envelhecido, segundo DAER/RS-EL 102/01. As amostras ensaiadas apresentaram os valores mostrados na Tabela 7. Verificou-se o aumento da quantidade do material fino, o que se justifica pelo uso do solvente no ensaio para determinação do teor de ligante que promove a separação dos agregados contidos nos grumos.

A Figura 14 mostra a representação gráfica das análises granulométricas médias realizadas no material fresado.

Tabela 6: Análises granulométricas do material fresado

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passante, em massa											
		Amostra 01		Amostra 10		Amostra 20		Amostra 30		Amostra 50		Média	
mm	pol. ou n°	Nat.	Dest.	Nat.	Dest.	Nat.	Dest.	Nat.	Nat.	Nat.	Dest.	Nat.	Dest.
50,8	2"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
38,1	1 1/2"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,3	97,1	99,1	100,0	99,1	100,0
25,4	1"	97,5	99,4	98,8	99,8	98,7	99,7	97,3	95,2	97,5	99,6	97,5	99,6
19,1	3/4"	94,3	99,1	96,1	99,8	97,1	99,5	91,9	92,9	94,5	99,5	94,5	99,5
12,7	1/2"	85,6	95,0	89,3	97,8	90,3	97,0	83,6	85,1	86,8	96,6	86,8	96,6
9,5	3/8"	79,1	90,0	83,7	92,8	83,4	93,1	78,9	80,1	81,0	92,0	81,0	92,0
4,76	n° 4	61,1	71,7	65,4	72,9	61,9	72,8	59,2	61,7	61,9	72,5	61,9	72,5
2,38	n° 8	46,8	53,2	45,6	54,0	45,7	52,3	45,1	47,1	46,1	53,2	46,1	53,2
0,59	n° 30	18,6	15,9	18,8	18,3	15,9	19,2	17,9	18,8	18,0	17,8	18,0	17,8
0,297	n° 50	8,0	4,2	7,4	5,9	6,0	7,8	7,1	7,9	7,3	6,0	7,3	6,0
0,149	n° 100	3,1	0,7	1,3	1,3	1,5	2,3	1,9	3,1	2,2	1,4	2,2	1,4
0,074	n° 200	1,9	0,4	2,3	0,4	0,6	0,4	0,6	1,8	1,4	0,4	1,4	0,4

Nota: Nat.: material ao natural. Dest.: material destorroado.

Tabela 7: Análises granulométricas do material fresado após extração do asfalto envelhecido

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passante, em massa			
mm	pol. ou n°	Amostra 01	Amostra 10	Amostra 20	Média
19,1	3/4"	100,0	100,0	100,0	100,0
12,7	1/2"	96,2	98,4	96,2	96,9
9,5	3/8"	93,8	94,7	91,7	93,4
4,76	n° 4	80,4	81,3	79,1	80,3
2,38	n° 8	64,2	64,5	63,6	64,1
0,59	n° 30	38,1	36,7	37,1	37,3
0,297	n° 50	25,1	24,0	24,1	24,4
0,149	n° 100	16,3	15,8	15,2	15,8
0,074	n° 200	13,2	12,7	12,0	12,6

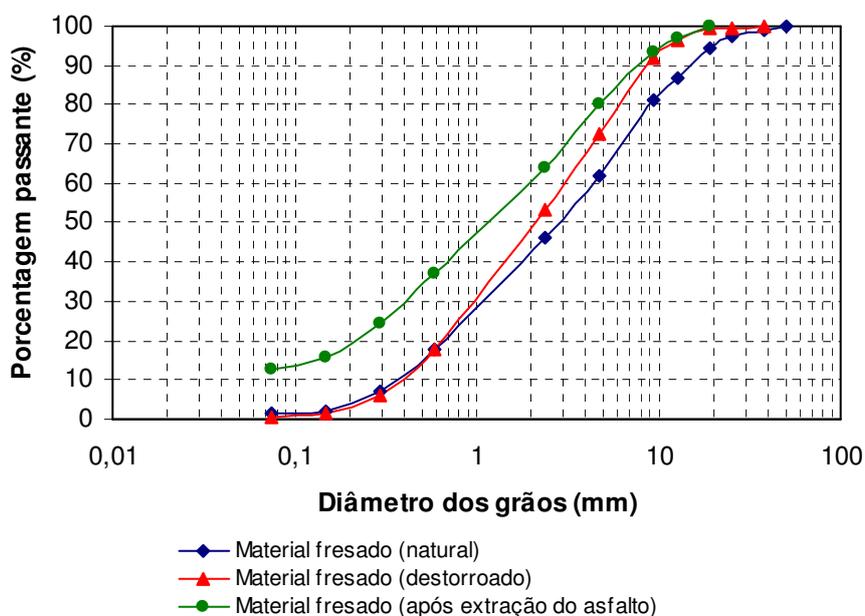


Figura 14: Análises granulométricas médias do material fresado

3.2.1.1.2 Determinação do teor de asfalto

O ensaio de determinação do teor de asfalto através de extração por refluxo (DAER/RS-EL 213/01) foi utilizado para obtenção do teor de asfalto existente nas amostras do material fresado. Para este estudo de laboratório foram ensaiadas três amostras, resultando, respectivamente, nos teores de 5,3 %, 5,2 % e 4,9 %. O teor médio de CAP obtido foi de 5,1 %. Observa-se que para a determinação do teor de asfalto do material fresado para

aplicação em obra, como a quantidade de material é grande, recomenda-se a realização de um número muito maior de ensaios.

3.2.1.1.3 Determinação do índice de lamelaridade

O índice de lamelaridade avalia a forma do agregado graúdo. A forma externa do agregado é um fator importante, pois influencia no comportamento sob a ação do tráfego, mostrando que grãos cúbicos têm melhor comportamento em relação a grãos chatos. Agregados lamelares possuem a tendência de deslizar, diminuindo o intertravamento entre os agregados da mistura. O ensaio de lamelaridade consiste em utilizar uma placa com diversas aberturas onde cada partícula de agregado é ensaiada. As partículas que passam nas respectivas aberturas são consideradas lamelares. O ensaio está padronizado no método DAER/RS-EL 108/01.

O ensaio de lamelaridade foi realizado em quatro amostras e resultou no valor médio de índice de lamelaridade de 23 %. Para as misturas tipo pré-misturado a frio, valores de até 40 % são aceitáveis, conforme consta na especificação DAER/RS-ES-P 19/91.

3.2.1.1.4 Determinação das partículas chatas e alongadas

A forma do agregado graúdo também pode ser avaliada através do ensaio de determinação das partículas chatas e alongadas. Os procedimentos de ensaio utilizados constam na norma ASTM D 4791. Para a realização do ensaio utiliza-se um calibrador proporcional (Figura 15), onde se escolhe uma proporção, posiciona-se o comprimento do agregado na maior abertura, fixa-se o pino que indica a proporção e posiciona-se a espessura do agregado na menor abertura. Caso a espessura passe livremente por esta abertura, considera-se esta uma partícula chata e alongada. Esse procedimento é realizado para uma amostra representativa de agregado graúdo, maior que 4,76 mm, utilizando 100 partículas de cada fração.

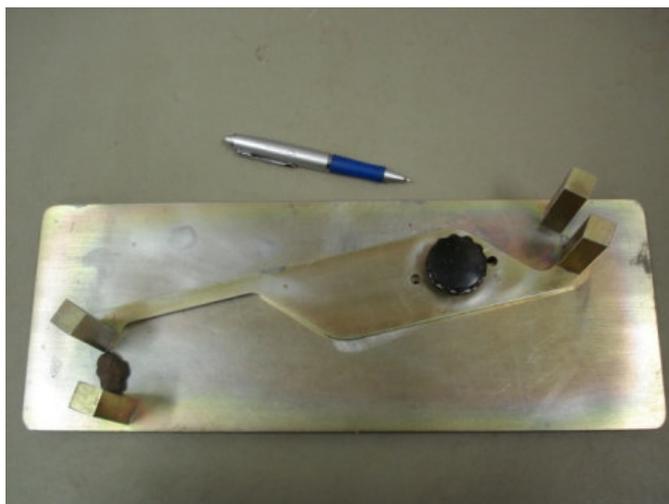


Figura 15: Calibrador proporcional utilizado para a determinação das partículas chatas e alongadas

As partículas chatas e alongadas foram determinadas através da porcentagem em peso de agregados graúdos que têm a relação comprimento e espessura maior que três. O resultado médio obtido foi de 14 % indicando que o material fresado enquadra-se na especificação para *Stone Matrix Asphalt* (SMA), que é mais rigorosa do que a especificação da metodologia *Superior Performing Asphalt Pavements* (SUPERPAVE) para este tipo de análise, exigindo o valor máximo de 20 % de partículas chatas e alongadas utilizando a proporção 1:3 (D' ANGELO, 2000).

3.2.1.1.5 Determinação do desgaste por abrasão *Los Angeles*

O ensaio de desgaste por abrasão *Los Angeles* estima a resistência de agregados à abrasão e degradação mecânica durante a manipulação, usinagem, construção e sob a ação do tráfego. Conforme especificação para misturas asfálticas a frio DAER/RS-ES-P 19/91, o valor máximo de desgaste permitido é de 40 %. O material fresado apresentou valores médios de desgaste por abrasão *Los Angeles* de 40 % (estado natural) e de 30 % (após destorroamento). Os ensaios foram realizados segundo o método DAER/RS-EL 103/01.

3.2.1.1.6 Determinação do equivalente de areia

Este ensaio tem por objetivo detectar a presença de finos plásticos nos agregados miúdos. Esses finos plásticos provocam fenômenos de retração e inchamento quando estão presentes nas misturas asfálticas. O resultado é dado em porcentagem de equivalente de areia. O Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS) exige, para misturas asfálticas a frio, o valor mínimo de 50 %. Os ensaios foram realizados segundo o método DAER/RS-EL 006/01, utilizando amostras provenientes do material fresado após extração do ligante asfáltico e resultaram no valor médio de 65 %.

3.2.1.1.7 Determinação da massa específica real, aparente e absorção

A massa específica de um material é a relação entre a massa e o volume do material. A massa específica real é a relação entre a massa e o volume do sólido e poros impermeáveis do material, enquanto que a massa específica aparente é a relação entre a massa e o volume do sólido, poros impermeáveis e poros permeáveis do material. A porosidade do agregado é avaliada através do ensaio de absorção de água. Indica a quantidade de água que um agregado é capaz de absorver quando em contato com a mesma.

O ensaio realizado na amostra de agregado graúdo, obtida após a extração do ligante asfáltico, foi realizado através do método de ensaio DAER/RS-EL 105/01 apresentando os resultados de:

- massa específica real = 26,60 kN/m³
- massa específica aparente = 26,09 kN/m³
- absorção = 0,7 %

O ensaio de massa específica real do agregado miúdo foi realizado, utilizando picnômetro, conforme o método DNER-ME 084/95, resultando no valor de 26,66 kN/m³.

3.2.2 Agregado adicional

O agregado adicional é proveniente do mesmo tipo de rocha do material fresado, granítica. Consiste em um pó de pedra graduado e foi coletado nas instalações de britagem da pedreira Pedraccon, localizada em Porto Alegre. Ao longo do texto, este agregado será denominado como “pó de pedra” ou simplesmente “pó”.

3.2.2.1 Caracterização do agregado adicional

A caracterização do agregado adicional foi realizada através dos ensaios de granulometria por peneiramento, equivalente de areia e massa específica real, utilizando os mesmos métodos citados anteriormente, para caracterização do material fresado. Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Caracterização do pó de pedra

Análise granulométrica		
Peneira de malha quadrada		Porcentagem passante, em massa
mm	pol. ou n°	
9,5	3/8"	100,0
4,76	n° 4	98,2
2,38	n° 8	69,2
0,59	n° 30	29,9
0,297	n° 50	21,0
0,149	n° 100	13,8
0,074	n° 200	10,6
Equivalente de areia (%)		64
Massa específica real (kN/m ³)		26,05

3.3 MATERIAIS ASFÁLTICOS

Foram utilizados nesta pesquisa dois tipos de ligantes asfálticos. Estes são descritos e caracterizados nos itens seguintes, assim como o ligante asfáltico envelhecido, proveniente do material fresado estudado. Os métodos de ensaios que foram empregados na caracterização dos materiais asfálticos também são comentados a seguir.

3.3.1 Materiais asfálticos utilizados

Os materiais asfálticos foram fornecidos pela empresa Betunelkoch, compreendendo a emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta RL-1C e o agente de reciclagem emulsionado ARE-75. A escolha desses dois tipos de ligantes deve-se ao fato da mistura em estudo tratar-se de uma mistura asfáltica fria e densa. Como já descrito anteriormente, as emulsões do tipo RL-1C são indicadas neste caso. Já o agente de reciclagem emulsionado ARE-75 foi escolhido por possuir uma determinada quantidade de asfalto e ainda uma baixa viscosidade, podendo ser misturado de uma maneira fácil e eficiente na mistura.

3.3.2 Métodos de ensaios utilizados para caracterização dos materiais asfálticos

Os ensaios nos materiais asfálticos são realizados a fim de verificar o enquadramento dos mesmos nas respectivas especificações técnicas.

3.3.2.1 Viscosidade Saybolt Furol

A viscosidade também é uma forma de medir a consistência (velocidade de escoamento) do material asfáltico. O ensaio consiste em medir o tempo em segundos que uma amostra, a uma determinada temperatura, leva para completar a marca de 60 ml de um frasco padrão, passando pelo orifício do viscosímetro Saybolt Furol. O ensaio padronizado para emulsão asfáltica consta no método DAER/RS-EL 202/01.

A viscosidade relacionada com a temperatura é uma forma adequada de determinar a temperatura de trabalho dos ligantes e misturas asfálticas. Deste modo, conhecendo-se a consistência desejada do ligante asfáltico para realizar certas operações, obtém-se a temperatura a ser empregada.

3.3.2.2 Peneiramento

O ensaio de peneiramento é realizado em emulsões asfálticas. Tem como objetivo detectar a presença de glóbulos de asfalto de grandes dimensões. O ensaio consiste em passar aproximadamente 1000 ml na peneira n° 20 (0,84 mm) e determinar, em peso, a porcentagem retida. O ensaio padronizado consta no método DAER/RS-EL 207/01.

3.3.2.3 Sedimentação

Caracteriza a capacidade de uma emulsão asfáltica apresentar uma estabilidade à estocagem prolongada sem que haja separação das fases constituintes. O ensaio consiste em colocar 500 ml de amostra em uma proveta, deixar em repouso por cinco dias, após retira-se 50 g do topo e 50 g do fundo e determinam-se os resíduos por evaporação. Calcula-se a diferença dos resíduos e determina-se a porcentagem em relação a 50 g. O ensaio está normalizado pela ABNT NBR 6570.

3.3.2.4 Mistura com cimento

Este ensaio é realizado em emulsões de ruptura lenta, está normalizado pela ABNT NBR 6297. A finalidade do ensaio é verificar se a emulsão apresenta-se imune à coalescência rápida das partículas de asfalto em contato com materiais finos. No ensaio, 50 g de cimento são misturadas com 100 ml de emulsão previamente diluída em água de modo a se obter 55 % de resíduo asfáltico. A seguir lava-se a mistura em uma peneira de 1,4 mm e determina-se, após secagem, a porcentagem de material retido na peneira.

3.3.2.5 Carga da partícula

A determinação da carga da partícula tem a finalidade de verificar se a emulsão em análise possui carga positiva, negativa ou é não iônica. O ensaio consiste em introduzir dois eletrodos em aproximadamente 100 ml de emulsão fazendo passar uma corrente elétrica de 8 mA. Decorridos 30 minutos ou após a corrente cair 2 mA, retiram-se os eletrodos, lavando-os com

água corrente. Observa-se em qual dos eletrodos há CAP depositado, se for no positivo, a emulsão é catiônica, no negativo, a emulsão é aniônica e se não houver CAP depositado a emulsão é não iônica. O ensaio está normalizado pela ABNT NBR 6567.

3.3.2.6 Resíduo por evaporação

Através do ensaio de resíduo por evaporação determina-se a quantidade presente de resíduo asfáltico na emulsão. O ensaio é normalizado pelo DAER/RS-EL 210/01. Consiste em eliminar a fase aquosa da emulsão, através de aquecimento em estufa. Após, determina-se por diferença de massa, o CAP residual.

3.3.2.7 Resíduo por destilação

O ensaio de destilação é utilizado para determinar as proporções relativas de CAP e água na emulsão asfáltica. No ensaio, destila-se uma amostra de aproximadamente 200 g de emulsão, sob condições estabelecidas com temperatura final do ensaio de 260 °C. A porcentagem do resíduo asfáltico é determinada por diferença de massa. Os procedimentos do ensaio constam na ABNT NBR 6568.

3.3.2.8 Penetração

Através do valor da penetração avalia-se a consistência do cimento asfáltico de petróleo. Quanto menor a penetração maior é a consistência do CAP. O ensaio de penetração consiste em medir a distância percorrida em décimos de milímetros por uma agulha padronizada sob certas condições determinadas (temperatura de 25 °C, tempo de penetração de 5 segundos e carga de 100 g). O método DAER/RS-EL 203/01 descreve os procedimentos deste ensaio. A Figura 16 mostra um penetrômetro eletrônico.

Segundo DNER (1996), este ensaio isoladamente não caracteriza perfeitamente a qualidade de um cimento asfáltico, contudo, fornece uma indicação do seu grau de dureza, sendo utilizado em algumas especificações como parâmetro de classificação e, principalmente, para

caracterizar o comportamento do material betuminoso recuperado de um pavimento existente. Valores de penetração abaixo de 15 (0,1 mm) estão associados a betumes envelhecidos e quebradiços.



Figura 16: Penetrômetro eletrônico

3.3.2.9 Ponto de amolecimento anel e bola

O ponto de amolecimento determina a temperatura que o asfalto amolece quando aquecido sob condições padronizadas. Como o asfalto não tem um ponto de fusão bem definido, o ponto de amolecimento serve como uma referência semelhante a este ponto. O ponto de amolecimento anel e bola é a mais baixa temperatura na qual uma esfera metálica atravessa um anel preenchido com asfalto percorrendo uma determinada distância, atendendo condições padronizadas. O ensaio está normalizado através da ABNT NBR 6560. O equipamento eletrônico para determinação do ponto de amolecimento é mostrado na Figura 17.



Figura 17: Equipamento eletrônico para ensaio de ponto de amolecimento

3.3.2.10 Ductilidade

A ductilidade é a propriedade de um material suportar grandes deformações (alongamento) sem ruptura. Quanto mais dúctil o material, maior a sua flexibilidade. O ensaio de ductilidade consiste em determinar a distância em centímetros que a amostra de material asfáltico se rompe quando submetida à tração em condições padronizadas. A temperatura do ensaio é de 25° C e a velocidade de deformação é de 5 cm/min. Os procedimentos do ensaio estão descritos no método DAER/RS-EL 208/01.

3.3.2.11 Recuperação de asfalto pelo método rotavapor

Para determinar as características do asfalto de uma mistura asfáltica é necessário extraí-lo do agregado por meio de solventes adequados para depois recuperá-lo da solução (solvente+asfalto) de maneira que não ocorram mudanças significativas nas propriedades do asfalto. O método ASTM D 5404 padroniza a recuperação do asfalto utilizando o equipamento rotavapor. O ensaio consiste em destilar a solução, previamente extraída pelo método centrífugo, em um frasco de destilação rotativo parcialmente imerso no banho de óleo aquecido do rotavapor enquanto a solução é submetida a um vácuo parcial e a um fluxo de gás nitrogênio ou dióxido de carbono. Como resultado do ensaio tem-se o asfalto recuperado, que

pode então ser submetido a diversos ensaios. O equipamento rotavapor é apresentado na Figura 18.



Figura 18: Rotavapor - equipamento para recuperação de asfalto

3.3.3 Caracterização do ligante recuperado do material fresado

O ligante asfáltico foi recuperado do material fresado pelo método rotavapor sendo previamente utilizado o método centrífugo (rotarex, segundo DAER/RS-EL 214/01 e centrífuga específica para extração de finos do ligante). No ligante asfáltico recuperado foram realizados os ensaios de penetração e ponto de amolecimento. Os resultados provenientes de três amostras escolhidas aleatoriamente encontram-se na Tabela 9. Observa-se que o ligante asfáltico recuperado mostra um elevado grau de envelhecimento, apresentado valores de penetração inferiores a 10 (0,1 mm).

Tabela 9: Caracterização do asfalto envelhecido recuperado

Características	Unidades	Resultados		
		Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
Penetração*	0,1 mm	5	5	2
Ponto de Amolecimento*	°C	89	87	112

*Ensaio realizado pela empresa Betunelkoch

3.3.4 Caracterização da emulsão asfáltica RL-1C

A amostra de emulsão asfáltica RL-1C foi caracterizada através dos ensaios de viscosidade Saybolt Furol, peneiramento, sedimentação, mistura com cimento, carga da partícula e ensaios realizados no resíduo, obtidos através de evaporação, quais sejam: penetração, ponto de amolecimento anel e bola e ductilidade. A Tabela 10 apresenta o resumo dos ensaios, com os respectivos limites especificados na norma ABNT NBR 14594.

Tabela 10: Caracterização da emulsão RL-1C

Ensaio	Unidades	Resultados	Especificação
Ensaio sobre a emulsão:			
Viscosidade Saybolt Furol (50 °C)	s	15	máx. 70
Peneiramento	%	0,08	máx. 0,1
Resíduo por evaporação	%	61,0	mín. 60
Resíduo por destilação*	%	60,8	mín. 60
Sedimentação*	%	3,1	máx. 5
Mistura com cimento*	%	1,3	máx. 2
Carga da partícula*	-	positiva	positiva
Ensaio sobre o resíduo por evaporação:			
Penetração	0,1 mm	50,0	50 - 250
Ductilidade	cm	não rompeu	mín. 40

*Ensaio realizado pela empresa Betunelkoch

3.3.5 Caracterização do agente de reciclagem emulsionado ARE-75

Para caracterizar a amostra de agente de reciclagem emulsionado foram realizados diversos ensaios, tais como viscosidade Saybolt Furol, sedimentação, peneiramento e resíduo por evaporação. O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 11, juntamente com os valores requeridos pela especificação proposta pelo IBP (1999).

Tabela 11: Caracterização do agente de reciclagem emulsionado ARE-75

Ensaio	Unidades	Resultados	Especificação
Ensaio sobre o ARE-75:			
Viscosidade Saybolt Furol (25 °C)*	s	19	máx. 70
Peneiramento	%	0,0	máx. 0,1
Resíduo por evaporação	%	61,7	mín. 60
Resíduo por destilação*	%	62,0	mín. 60
Sedimentação*	%	3,2	máx. 5
Ensaio sobre o resíduo por destilação:			
Viscosidade cinemática a 60 °C* (NBR 14756)	cSt	10500	4501 - 12500
Teor de saturados* (ASTM D 2007)	%	18	máx. 30
ECA, 163 °C, razão de viscosidade* (NBR 14736)	%	3,3	4
ECA, 163 °C, variação de massa* (NBR 14736)	%	1,8	máx. 3

*Ensaio realizado pela empresa Betunelkoch

3.4 MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

No estudo de laboratório, primeiramente foram definidas as granulometrias das misturas, para, após, proceder à moldagem dos corpos-de-prova e submetê-los aos ensaios especificados para a avaliação das misturas asfálticas.

3.4.1 Definição da composição granulométrica

Conhecendo-se a granulometria média do material fresado, pode-se verificar que o material em estudo apresenta-se próximo à Faixa D - graduação densa indicada pelo Asphalt Institute (1983) para mistura reciclada a frio. Também foi feita uma comparação com a faixa C para concreto asfáltico especificada pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) em DNIT 031/2006 - ES. Concluiu-se que o material em estudo possui deficiência de partículas com diâmetro menor que 0,59 mm (peneira n° 30), não se enquadrando na faixa do Asphalt Institute (1983) e praticamente tangenciando o limite inferior da faixa C do concreto asfáltico (*ver* Figura 19).

Nesta pesquisa foram utilizadas duas granulometrias para as misturas recicladas: uma correspondente à granulometria do material fresado e outra resultante da composição do material fresado e agregado virgem adicional (pó de pedra), conforme Figura 19.

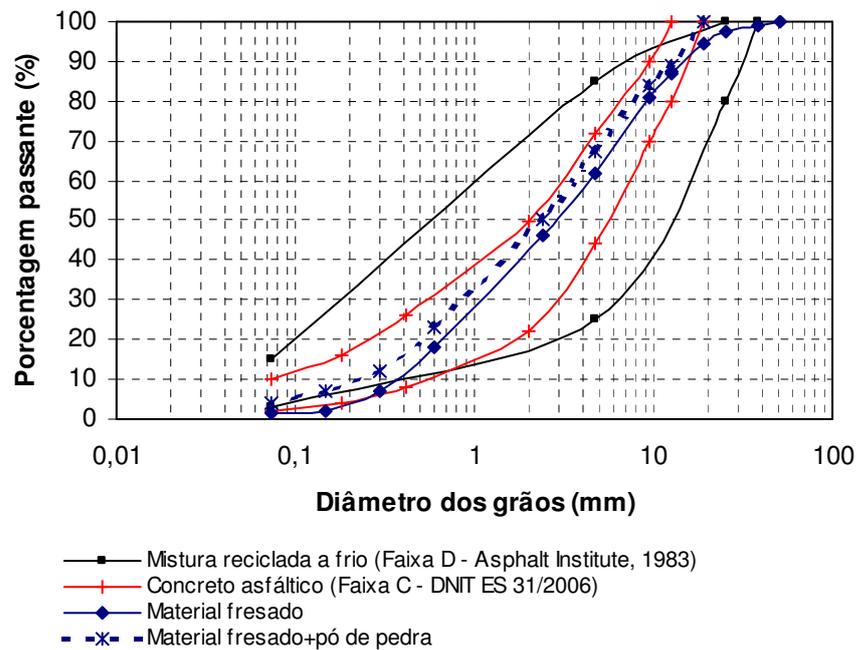


Figura 19: Faixas granulométricas especificadas e granulometrias das misturas recicladas

O acréscimo de pó de pedra foi realizado de modo que houvesse um melhor enquadramento nas referidas faixas, aumentando a quantidade de material correspondente às frações mais finas da mistura. Com a adição deste material, também poderá ser observada a influência do mesmo no comportamento mecânico das misturas.

Na Tabela 12 são apresentados os valores das duas granulometrias das misturas empregadas no estudo laboratorial. Observa-se que a os agregados maiores que 19,1 mm do material fresado foram desconsiderados, pois representavam uma porcentagem pequena do material (em torno de 5%).

Tabela 12: Granulometrias das misturas empregadas no estudo laboratorial

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passante, em massa	
mm	pol. ou n°	Material fresado	Material fresado + pó de pedra
19,1	3/4"	100,0	100,0
12,7	1/2"	86,8	88,8
9,5	3/8"	81,0	83,9
4,76	n° 4	61,9	67,3
2,38	n° 8	46,1	50,4
0,59	n° 30	18,0	23,3
0,297	n° 50	7,3	12,3
0,149	n° 100	2,2	7,1
0,074	n° 200	1,4	3,9

Para atingir o objetivo do trabalho cada uma dessas granulometrias, resultantes do material fresado e da mistura do material fresado com pó de pedra, foram estudadas com dois ligantes asfálticos, emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta RL-1C e agente de reciclagem emulsionado ARE-75, resultando em quatro misturas asfálticas conforme denominação a seguir:

- Fresado+RL-1C
- Fresado+ARE-75
- Fresado+pó de pedra+RL-1C
- Fresado+pó de pedra+ARE-75

3.4.2 Moldagem dos corpos-de-prova

Nesta pesquisa foi utilizado o ensaio Marshall para misturas asfálticas a frio, normalizado pelo DNER-ME 107/94. Foram moldados três corpos-de-prova para cada teor de ligante asfáltico, com aproximadamente 101,6 mm de diâmetro e 6,35 mm de altura correspondendo aos pesos de 957 g para os corpos-de-prova das misturas sem adição de pó e de 980 g para as misturas com adição de pó. Os teores variaram de 0,5 % a 3,5 %, com incremento de 0,5%, em relação à massa de agregados secos. Estes teores foram escolhidos baseados na revisão da literatura. Os procedimentos realizados para a moldagem dos corpos-de-prova são descritos a seguir.

3.4.2.1 Secagem das amostras

As amostras foram secas em estufa a 60 °C. O período de 48 horas foi suficiente para a secagem das amostras nesta temperatura. A utilização de 60 °C foi para assegurar que não houvesse modificação nas propriedades do material fresado (LEE; BRAYTON; HUSTON, 2002).

3.4.2.2 Fracionamento das amostras

Após a secagem, as amostras eram fracionadas utilizando todas as peneiras usadas para a determinação da granulometria. O fracionamento resultou em nove porções da amostra, com diferentes tamanhos de partículas, como mostra a Tabela 13. Este fracionamento foi realizado para garantir uma maior homogeneidade de granulometria das amostras ensaiadas.

Tabela 13: Fracionamento das amostras

Fração	Passando na peneira	Retido na peneira
01	3/4"	1/2"
02	1/2"	3/8"
03	3/8"	n° 4
04	n° 4	n° 8
05	n° 8	n° 30
06	n° 30	n° 50
07	n° 50	n° 100
08	n° 100	n° 200
09	n° 200	-

3.4.2.3 Pesagem dos materiais pétreos dos corpos-de-prova

As pesagens das amostras para composição dos corpos-de-prova foram feitas considerando a contribuição de cada fração, conforme a granulometria empregada, uma utilizando somente o material fresado e a outra utilizando material fresado e pó de pedra. A Figura 20 apresenta as frações dos materiais para obtenção dos corpos-de-prova. A realização do fracionamento e pesagem das frações dos agregados tem como objetivo manter a mesma granulometria para cada corpo-de-prova.

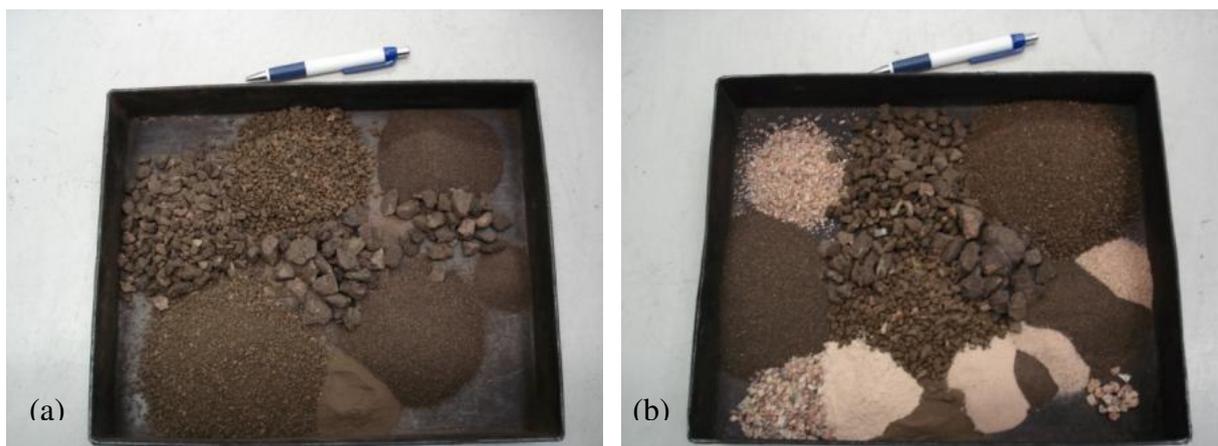


Figura 20: Composição dos corpos-de-prova
(a) material fresado
(b) material fresado e pó de pedra

3.4.2.4 Adição de água

Nas misturas asfálticas realizadas a frio, é recomendável acrescentar água antes da adição do ligante asfáltico para proporcionar um melhor envolvimento das partículas pelo ligante. Santana (1993) indica a realização de misturas experimentais para determinar visualmente a trabalhabilidade e o envolvimento e assim escolher o teor de água de molhagem. Asphalt Institute (1989a) indica que em determinado ponto, o acréscimo de água não melhora o cobrimento das partículas. Neste caso, deve ser adotada a menor quantidade de água.

Para as misturas asfálticas recicladas a frio são indicados teores de água variando de 2,0 % a 4,5 %, onde o teor de projeto deve ser obtido através de dosagens e avaliação da massa específica aparente (LEE; BRAYTON; HUSTON, 2002). A quantidade de água adicionada às misturas foi determinada através de uma dosagem preliminar e misturas experimentais, sendo que os resultados constam no item 4.1 deste trabalho. A Figura 21 mostra a adição de água através de pesagem.



Figura 21: Adição de água antes da adição de ligante

3.4.2.5 Mistura e adição de ligante

Depois da adição da água de molhagem, as amostras foram misturadas manualmente e em seguida acrescentou-se o ligante asfáltico e novamente homogeneizou-se as amostras. A Figura 22 apresenta estas operações.

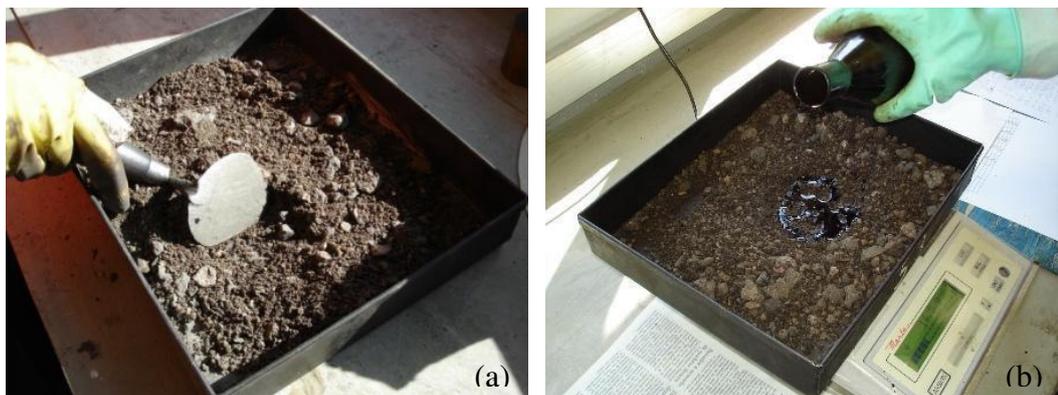


Figura 22: Mistura com água e adição de ligante

(a) mistura manual do fresado e água

(b) adição de ligante

3.4.2.6 Umidade de compactação

Conforme preconiza a norma DNER-ME 107/94, antes da compactação as amostras devem ser curadas. Portanto, ocorre uma perda da água total, que é composta pela água de molhagem e pela água da emulsão. Para misturas asfálticas a frio densas, sugere-se que a umidade de compactação corresponda a 60 % da umidade total (SANTANA, 1993).

Lee, Brayton e Huston (2002) propõem que a mistura asfáltica reciclada seja compactada uma hora após a realização da mistura com a emulsão asfáltica, a fim de que haja a ruptura da emulsão.

Neste estudo foi adotado o valor de 60 % da umidade total para realizar a compactação das amostras. Para obtenção da umidade especificada, as amostras foram submetidas a sucessivas pesagens ao longo do tempo, a fim de verificar se as mesmas já haviam perdido 40 % de água. Para acelerar o processo, as amostras foram colocadas em estufa a 40 °C. Porém, foram retiradas da estufa antes da perda total de água requerida, para que a temperatura de compactação correspondesse à temperatura ambiente. O tempo necessário para este procedimento para cada corpo-de-prova foi de aproximadamente 40 minutos. A temperatura de 40 °C não causa problemas, mas temperaturas acima de 50 °C podem provocar surgimento de fissuras nos corpos-de-prova, em função da rapidez de evaporação da água (SERFASS *et al.*, 2003). Clerman (2004) utilizou este procedimento no estudo sobre misturas asfálticas a frio.

O controle da evaporação da água por pesagem assegurou uma uniformidade de ruptura para todas as amostras utilizadas, fazendo com que todas as amostras fossem compactadas nas mesmas condições de umidade.

É pertinente colocar que, Cross (2003) pesquisou sobre o efeito da compactação de misturas asfálticas recicladas a frio utilizando compactador giratório e concluiu que as amostras podem ser compactadas antes ou depois da cura da emulsão, sem causar efeito significativo nas massas específicas aparentes.

3.4.2.7 Compactação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram compactados à temperatura ambiente utilizando compactador mecânico Marshall, com aplicação de 75 golpes em cada face. A Figura 23 mostra o equipamento utilizado.



Figura 23: Compactadores mecânicos tipo Marshall

Após a compactação, os corpos-de-prova foram colocados com molde em estufa a 60 °C para cura durante um período de 24 horas. Este procedimento consta na norma DNER-ME 107/94. Além disso, um estudo específico sobre as condições de cura de misturas asfálticas recicladas com emulsão, realizado por Lee, Brayton e Huston (2002), resultou nestas mesmas indicações. A conclusão do estudo foi de que a água é mais facilmente removida das amostras quando estas são submetidas à temperatura de 60 °C por 24 horas. Salomon e Newcomb (2000) também utilizaram essas mesmas condições de cura na pesquisa desenvolvida sobre procedimentos de projeto para misturas asfálticas recicladas a frio com emulsão asfáltica.

Transcorrido o período de cura dos corpos-de-prova aguardava-se o esfriamento por no mínimo 2 horas e realizava-se a extração dos corpos-de-prova do molde. Para cada corpo-de-prova moldado foram determinadas as alturas, resultantes da média de quatro determinações em posições diametralmente opostas e a massa específica aparente segundo o método

DAER/RS-EL 212/01, utilizando fita e parafina devido a porcentagem de vazios ser maior que 10 %. A Figura 24 mostra alguns dos corpos-de-prova cilíndricos moldados para cada mistura estudada.

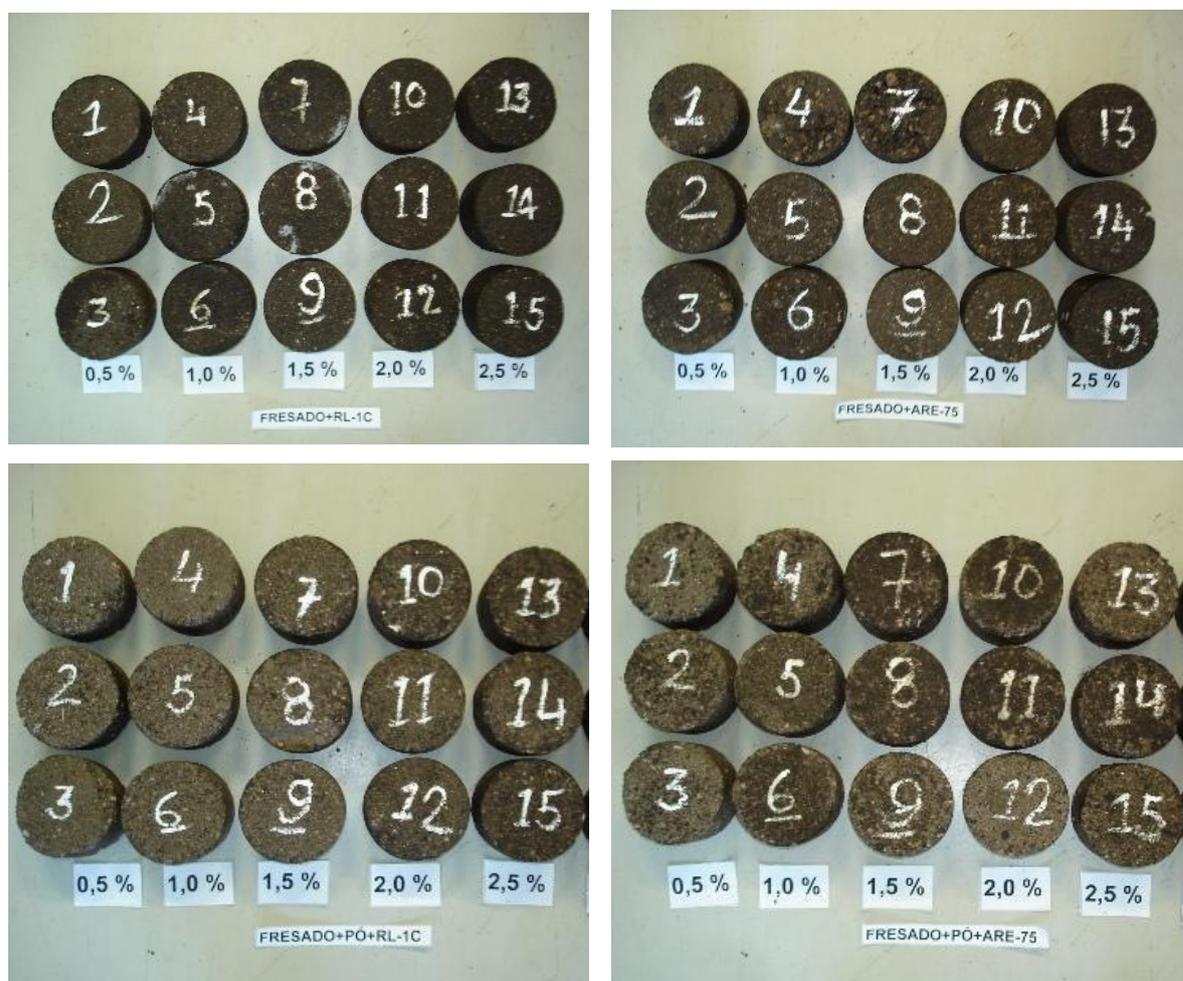


Figura 24: Conjuntos de corpos-de-prova moldados para cada mistura ensaiada

Na Figura 25 são apresentadas as partes internas de quatro corpos-de-prova. Cada corpo-de-prova corresponde a um tipo de mistura estudada, no teor de 3,0 % de ligante asfáltico. Pode-se observar que a aparência é a mesma para os corpos-de-prova que representam as misturas sem adição de pó de pedra. Isto não ocorre para os corpos-de-prova com adição de pó de pedra, pois o corpo-de-prova moldado com a mistura Fresado+pó+ARE-75 apresenta a distribuição de asfalto menos uniforme.

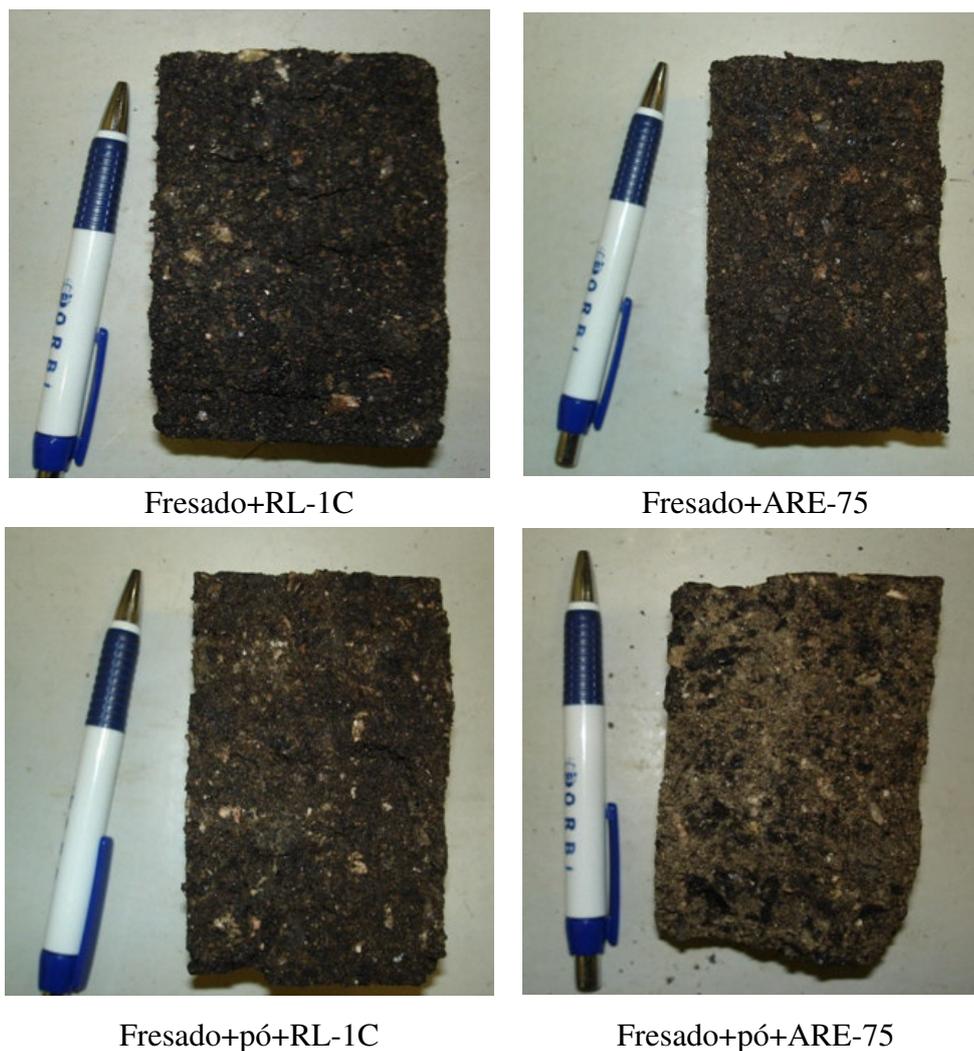


Figura 25: Parte interna dos corpos-de-prova para cada tipo de mistura estudada com 3,0 % de ligante asfáltico

3.4.3 Determinação da massa específica máxima de misturas asfálticas

Para a obtenção da massa específica máxima foi utilizado o procedimento preconizado pela ASTM D 2041. Esta massa específica é utilizada para determinar a porcentagem de vazios da mistura asfáltica. Para a realização do ensaio coloca-se uma amostra de mistura asfáltica na condição solta em um recipiente, adiciona-se água até a amostra ficar totalmente imersa e aplica-se vácuo para reduzir a pressão residual para 30 mmHg ou menos que será mantida por 15 ± 2 min. Através do peso seco da amostra, do peso do frasco cheio de água e do peso do frasco com a amostra e com o nível completo de água após a aplicação do vácuo, calcula-se a massa específica máxima da mistura asfáltica. Se a temperatura de ensaio for diferente de

25 °C, deve ser aplicada uma correção. A Figura 26 mostra os equipamentos utilizados no ensaio.



Figura 26: Equipamentos para determinação da massa específica máxima

Para a preparação das amostras usadas neste ensaio foram adotados os mesmos procedimentos aplicados para os corpos-de-prova, com exceção da compactação, pois a amostra para o ensaio deve apresentar-se no estado solto. As amostras foram obtidas por pesagem por fração, adição de água, mistura, adição de ligante, homogeneização e cura em estufa a temperatura de 60° C durante o período de 24 horas. Foram confeccionadas duas amostras para cada teor de ligante das quatro misturas estudadas, totalizando 56 ensaios. Os ensaios foram realizados na Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC).

3.4.4 Metodologia Marshall

Os conceitos do método Marshall de dosagem de misturas asfálticas foram formulados na década de 30 por Bruce Marshall, engenheiro do Departamento Estadual de Estradas de Rodagem do Mississippi, nos Estados Unidos. Durante o período da 2ª Guerra Mundial, o Corpo de Engenheiros do exército americano (USACE), após extensas pesquisas, melhoraram os procedimentos do ensaio Marshall e desenvolveram critérios de dosagem de misturas asfálticas para a pavimentação. Este método tornou-se conhecido e utilizado internacionalmente, sendo simples, rápido, de baixo custo e de relativa eficiência. O método

Marshall foi originariamente concebido para misturas asfálticas a quente, tendo se estendido para misturas asfálticas a frio.

No Brasil, as normas correntes preconizam o uso do método Marshall como instrumento para dosagem e controle de qualidade das misturas asfálticas para uso em pavimentação. Ogurtsova, Birman e Coelho (1995) e Motta *et al.* (1996) comentam sobre as limitações deste método. O método Marshall consiste na moldagem de corpos-de-prova padronizados com composição de agregados e ligante asfáltico para posterior determinação das propriedades físicas (massa específica aparente, volume de vazios, vazios no agregado mineral e a relação de vazios do agregado mineral preenchidos com asfalto) e propriedades mecânicas (estabilidade e fluência). A estabilidade e a fluência são obtidas através de uma prensa onde os corpos-de-prova são submetidos à compressão em um molde cilíndrico bipartido. O valor máximo da carga suportada é a estabilidade e o deslocamento correspondente é a fluência.

Para o estudo das misturas recicladas a frio foram determinadas a massa específica aparente, o volume de vazios, a estabilidade e a fluência. A massa específica aparente, como descrito anteriormente, foi determinada pelo método DAER/RS-EL 212/01, utilizando fita e parafina devido a porcentagem de vazios ser maior que 10 %. O volume de vazios foi calculado, conforme a norma ASTM D 3203, utilizando a massa específica máxima (ASTM D 2041) e a massa específica aparente, conforme equação a seguir:

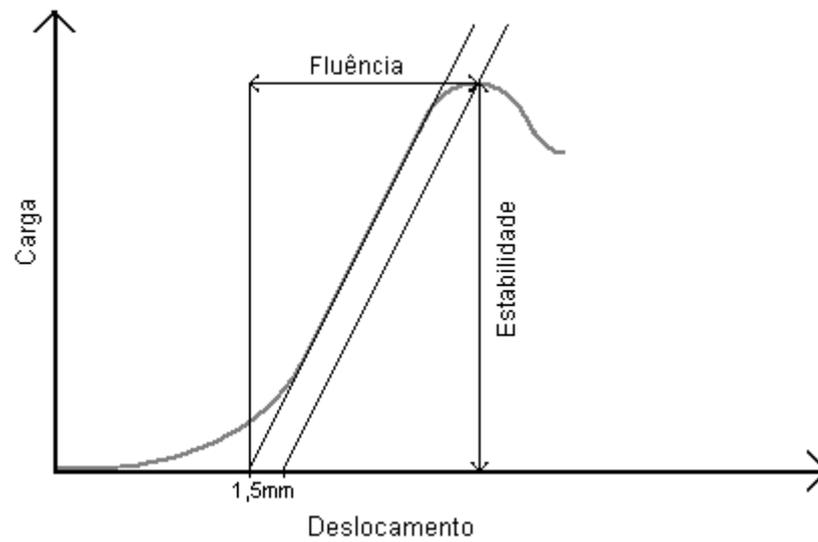
$$\text{Volume de vazios (\%)} = 100 (1 - \text{massa específica aparente} / \text{massa específica máxima})$$

Para a determinação da estabilidade e fluência os corpos-de-prova foram colocados previamente em estufa a 40° C por um período de 2 horas, como preconiza a norma DNER-ME 107/94. Para a realização dos ensaios utilizou-se uma prensa equipada com uma célula de carga e um transdutor de deslocamento, tipo *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT) com aquisição automática de dados, como ilustra a Figura 27.

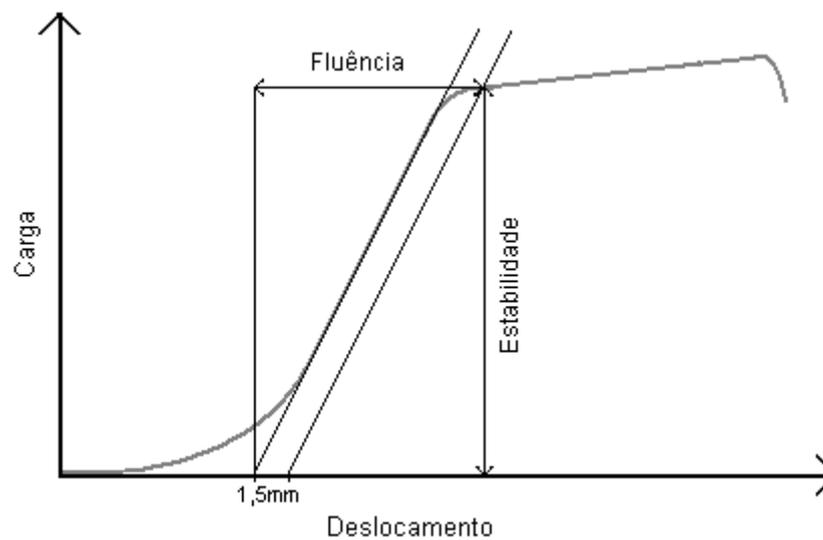


Figura 27: Prensa Marshall eletrônica

Os resultados de estabilidade e fluência foram obtidos através dos procedimentos descritos na norma ASTM D 6927. Quando necessário, a estabilidade foi corrigida em função das alturas dos corpos-de-prova moldados. Segundo esta norma, a estabilidade e a fluência são determinadas a partir do gráfico que representa a curva carga - deslocamento. Primeiramente traça-se uma tangente à parte linear da curva. A interseção da tangente com o eixo “x” (deslocamento) define o ponto inicial para a determinação da fluência. O ponto final é determinado traçando-se uma reta paralela à tangente, deslocada 1,5 mm da mesma, e que intercepte a curva. A deslocamento correspondente ao ponto de interseção com a curva é o ponto final. A fluência é igual à diferença dos valores de deformações correspondentes ao ponto final e inicial. A estabilidade corresponde ao valor da carga indicada pelo ponto final para determinação da fluência. A Figura 28 exemplifica a determinação da estabilidade e fluência e ilustra dois tipos de ruptura que têm sido observados, com as respectivas curvas “carga - deslocamento”, conforme consta na ASTM D 6927.



(a)



(b)

Figura 28: Curvas “carga - deslocamento” para determinação da estabilidade e fluência Marshall (Fonte: ASTM D 6927 (2006))

- (a) carga com pico definido
 (b) carga sem definição de pico

3.4.5 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para a determinação da resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland, sendo conhecido no exterior como “ensaio brasileiro”

(MEDINA, 1997; PINTO; PREUSSLER, 2002). O ensaio de resistência à tração por compressão diametral tem como finalidade determinar a resistência à tração de misturas asfálticas. O ensaio está padronizado no método DNER-ME 138/94. Consiste em aplicar uma carga vertical, distribuída em um friso curvo, no corpo-de-prova cilíndrico, até que ocorra o rompimento no plano diametral vertical, devido à tensão de tração. Quando a carga atua, tensões de compressão e tração são geradas, respectivamente, nas direções vertical e horizontal. A Figura 29 apresenta de forma esquemática o corpo-de-prova durante o ensaio.

O cálculo da resistência à tração é determinado através da seguinte fórmula:

$$R_T = \frac{2 \times F}{100 \times d \times h}$$

Onde:

R_T = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = carga aplicada (N);

d = diâmetro do corpo-de-prova (mm);

h = altura do corpo-de-prova (mm).

A temperatura utilizada para a determinação da resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova das misturas asfálticas foi de 25 °C.

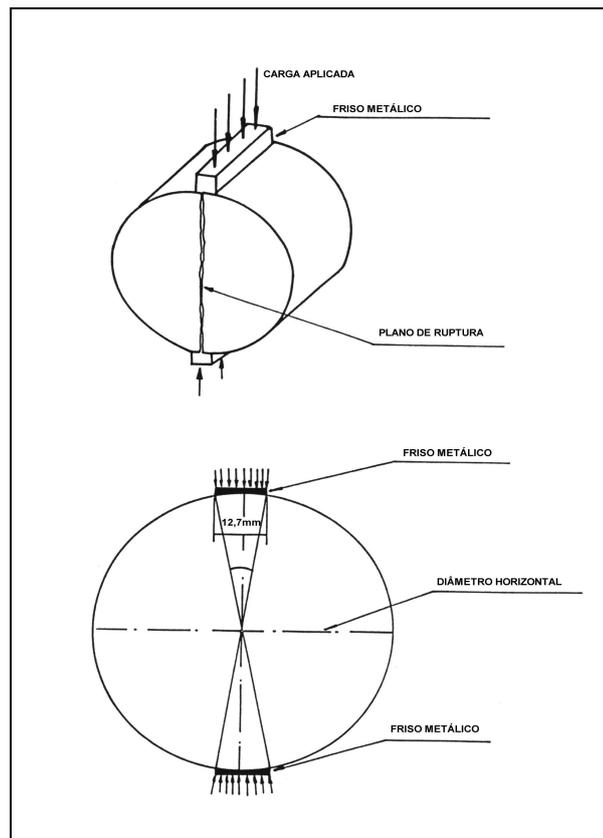


Figura 29: Corpo-de-prova durante o ensaio de resistência à tração
(Fonte: DNER (1994))

3.4.6. Módulo de resiliência

Resiliência significa energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações. Na mecânica dos pavimentos, convencionou-se chamar de deformação resiliente a deformação elástica ou recuperável de solos e materiais de pavimentação, sob a ação de cargas transientes repetidas. No ensaio de módulo de resiliência os materiais são submetidos a cargas repetidas de duração e frequência comparáveis àquelas provocadas pelo tráfego dos veículos nos pavimentos. O módulo de resiliência está relacionado à rigidez, principalmente no estudo de misturas asfálticas, indicando a capacidade de resistir à deformação (MEDINA, 1997). Os valores de módulo de resiliência podem ser usados para avaliação de materiais, projetos e análises de pavimentos (ASTM D 4123).

O módulo de resiliência de misturas asfálticas é determinado através do ensaio de compressão diametral com cargas repetidas, utilizando corpos-de-prova cilíndricos. Atribui-se a Schmidt,

da empresa Chevron, Califórnia, a aplicação do ensaio de compressão diametral para as misturas asfálticas sob carregamento repetido (MEDINA, 1997; PINTO; PREUSSLER, 2002). O ensaio consiste na aplicação de uma carga vertical distribuída em um friso que gera compressão na direção vertical e tração na direção horizontal. O deslocamento horizontal, provocado pela ação da carga é medido através de um transdutor tipo LVDT. O método de ensaio está normalizado pelo DNER-ME 133/94. Para o cálculo do módulo de resiliência é empregada a seguinte fórmula:

$$M_R = \frac{F}{\Delta \times h} \times (0,9976 \times \mu + 0,2692)$$

Onde:

M_R = módulo de resiliência (MPa);

F = carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova (N);

Δ = deformação elástica ou resiliente, medida no ciclo particular de repetição de carga (mm);

h = altura do corpo-de-prova (mm);

μ = coeficiente de Poisson.

Os ensaios foram realizados à frequência de aplicação da carga de 1 Hz com pulso de carga de duração de 0,1 s. A temperatura de ensaio foi 25 °C e a carga aplicada foi àquela correspondente a 15 % da resistência à tração por compressão diametral, determinada previamente em outro conjunto de três corpos-de-prova, para cada teor de ligante e tipo de mistura estudada. O coeficiente de Poisson foi fixado em 0,30. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de módulo de resiliência é apresentado na Figura 30.

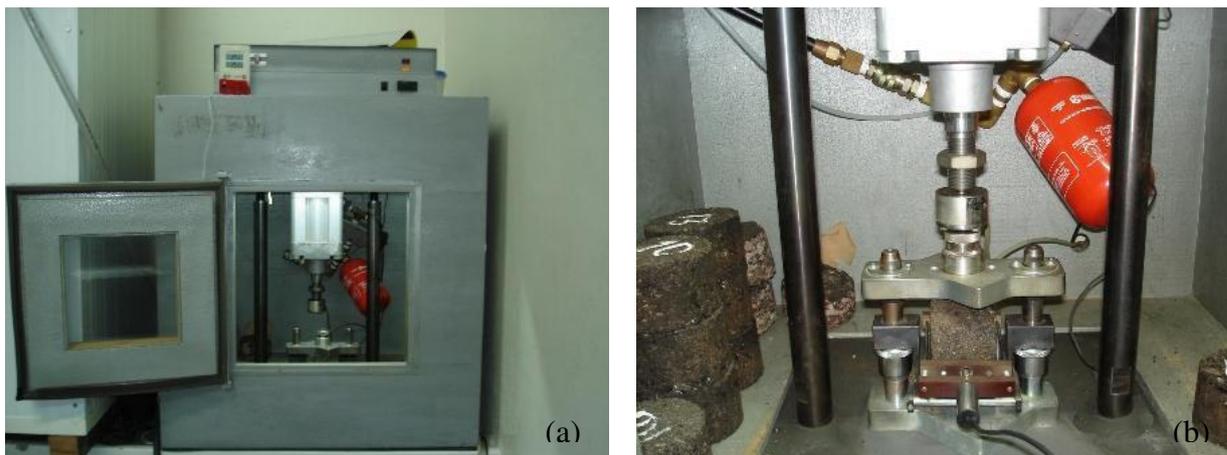


Figura 30: Equipamento para ensaio de módulo de resiliência
(a) vista geral
(b) equipamento durante o ensaio

3.4.7 Efeito da água na resistência à tração de misturas asfálticas

Este método de ensaio foi desenvolvido para medir a perda de resistência à tração por compressão diametral de misturas asfálticas compactadas, resultante da ação da água. O ensaio consiste em comparar os resultados de resistência obtidos de corpos-de-prova que foram previamente imersos em água em condições específicas, com os resultados de corpos-de-prova que não sofreram a ação da água. Este método é usado como um indicativo da suscetibilidade à água das misturas asfálticas compactadas. Quanto menor a relação entre as resistências, mais as misturas são influenciadas pela umidade. O ensaio é padronizado pela ASTM D 1075 e foi desenvolvido para misturas asfálticas com aproximadamente 6 % de volume de vazios.

O procedimento do ensaio é simples. São determinadas as resistências à tração por compressão diametral (conforme procedimento descrito no item 3.4.5 deste trabalho) de dois grupos de corpos-de-prova: o grupo que ficou ao ar, no mínimo 4 horas a 25 °C e o grupo que foi deixado imerso em água, primeiramente a 60 °C por 24 horas, seguido de imersão a 25 °C durante 2 horas (Figura 31). O índice de resistência à tração retida é calculado através da seguinte equação:

$$\text{Índice de resistência retida} = \frac{R_{T2}}{R_{T1}} \times 100$$

Onde:

R_{T1} = resistência à tração das amostras secas;

R_{T2} = resistência à tração das amostras após imersão em água.

Este método de ensaio foi aplicado nas amostras das misturas asfálticas em estudo, sofrendo duas adaptações:

- a) moldagem dos corpos-de-prova pelo método Marshall (DNER ME 107/94) e não por compressão estática (ASTM D 1074);
- b) o volume de vazios das amostras correspondendo a valores superiores a 6 %.



Figura 31: Equipamentos para determinação da resistência à tração retida

3.4.8 Verificação da granulometria e do teor de asfalto

Durante o desenvolvimento da pesquisa foram realizados alguns ensaios a fim de verificar se as amostras ensaiadas apresentavam-se homogêneas e estavam correspondendo ao previsto na caracterização inicial e nas dosagens. Os ensaios utilizados compreenderam a determinação do teor de asfalto através de extração por refluxo e a análise granulométrica por peneiramento, seguindo, respectivamente, os métodos DAER/RS-EL 213/01 e DAER/RS-EL 102/01.

Primeiramente, foram ensaiadas duas amostras pesadas com as respectivas frações correspondentes à mistura sem adição de pó de pedra, na quantidade utilizada para a confecção de um corpo-de-prova, isto é, de 957 gramas, denominadas amostras A e B. Escolheram-se essas amostras com o objetivo de comparar os resultados de granulometria e teor de ligante envelhecido com os respectivos valores médios, definidos na caracterização do material fresado.

Depois, foram selecionados dois corpos-de-prova, um denominado CP 11, composto da mistura Fresado+RL-1C, com teor de 1,5 % de emulsão RL-1C e outro, denominado CP 15, composto da mistura Fresado+ARE-75, com teor de 2,5 % de agente de reciclagem emulsionado ARE-75. Com os resultados dos ensaios realizados nestes corpos-de-prova pode-se avaliar a granulometria e a quantidade de ligante residual total das amostras (CAP envelhecido, acrescido do CAP dos ligantes adicionados).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão os resultados obtidos dos ensaios realizados nas misturas asfálticas recicladas a frio. Sua apresentação é feita de uma maneira que possibilita a comparação entre as quatro misturas estudadas: Fresado+RL-1C, Fresado+ARE-75, Fresado+pó+RL-1C e Fresado+pó+ARE-75. Além dos ensaios que caracterizam as misturas, são mostrados os resultados da verificação da granulometria e do teor de asfaltos. O primeiro resultado apresentado corresponde à água de molhagem, seguido dos resultados de massa específica máxima, de estabilidade, de fluência, de massa específica aparente e do volume de vazios. Após, são relatadas as características mecânicas de resistência à tração e de módulo de resiliência. Por último estão os valores de resistência à tração retida de amostras compactadas.

4.1 ÁGUA DE MOLHAGEM

Para a determinação do teor de água de molhagem escolheu-se, para a realização de uma dosagem preliminar, uma mistura e um teor de emulsão. Dessa forma, foi feita uma dosagem preliminar da mistura Fresado+RL-1C, fixando-se em 1,5 % o teor de emulsão asfáltica RL-1C e variando a quantidade de água de 2,0 % a 5,0 %, em relação à massa de agregados secos, com acréscimos de 1,0 %. Para cada teor de água de molhagem foram moldados três corpos-de-prova. Os resultados, correspondentes à média, de estabilidade, fluência, massa específica aparente e volume de vazios estão apresentados nas Figura 32.

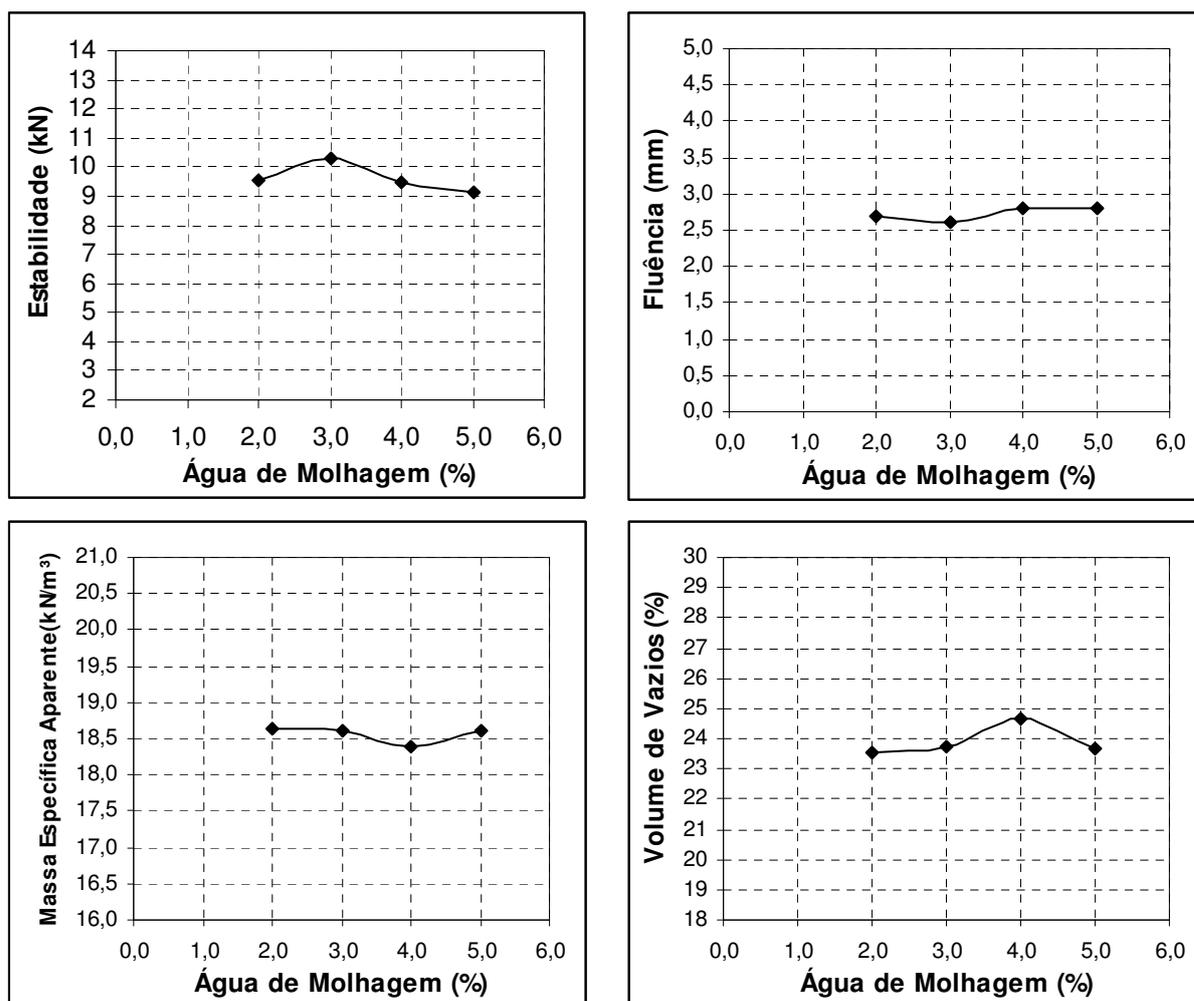


Figura 32: Resultados de estabilidade, fluência, massa específica aparente e volume de vazios com o aumento da água de molhagem para a mistura Fresado+RL-1C com 1,5 % de RL-1C

Os resultados mostraram que não há diferença significativa na estabilidade, fluência, massa específica aparente e volume de vazios com o aumento da quantidade de água de molhagem. Portanto, optou-se pela menor quantidade de água devido à maior rapidez de ruptura da emulsão para a realização da compactação das amostras, isto é, 2,0 % em massa. Quando foi utilizado pó de pedra, a porcentagem de água utilizada foi de 2,5 %, para proporcionar as mesmas condições de trabalhabilidade e envolvimento observadas na mistura do material fresado sem adição de pó. Isso foi determinado experimentalmente através de observação visual. Adotaram-se estes mesmos valores quando foi empregado agente de reciclagem emulsionado.

4.2 MASSAS ESPECÍFICAS MÁXIMAS

Para as quatro misturas estudadas foram determinadas as massas específicas máximas correspondentes a cada teor de ligante asfáltico utilizado. Os resultados apresentados na Figura 33 correspondem à média de dois ensaios realizados em duas diferentes amostras, para cada teor e cada tipo de mistura.

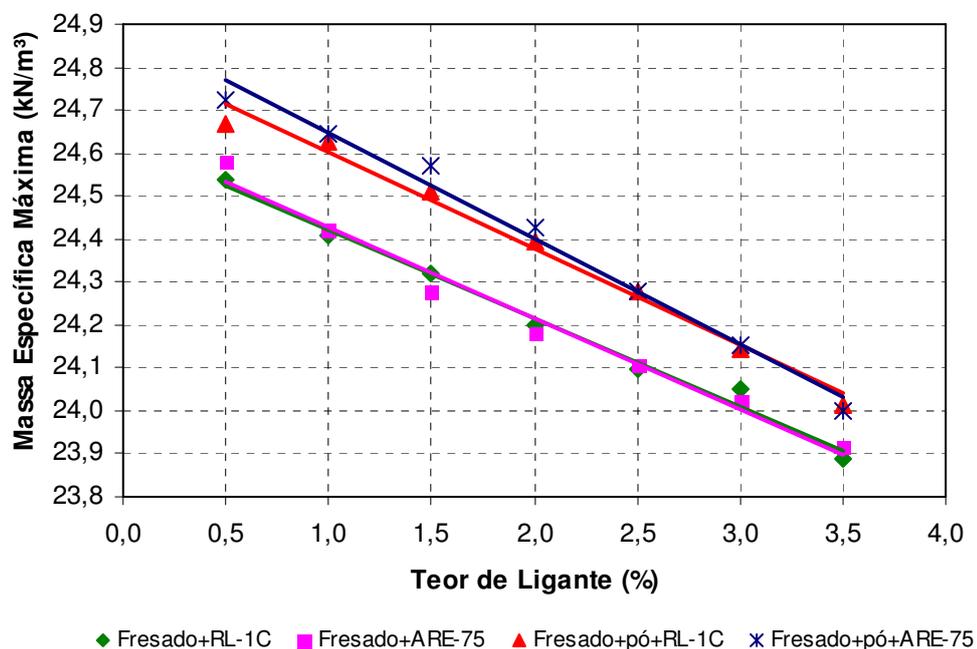


Figura 33: Massa específica máxima *versus* teor de ligante

Os resultados mostram que todas as misturas apresentam uma redução da massa específica máxima com o aumento do teor de ligante. Isto era esperado, pois à medida que se adiciona asfalto, ocorre um aumento de volume e conseqüentemente uma redução na massa específica máxima. Verifica-se também que as massas específicas das misturas com adição de pó de pedra apresentam valores mais elevados do que os das misturas sem adição de pó. As massas específicas não apresentam variação considerando os dois tipos de ligantes ensaiados.

4.3 CARACTERÍSTICAS MARSHALL

Foram realizadas quatro dosagens Marshall, uma para cada mistura estudada, ou seja, utilizando dois tipos de ligantes e dois tipos de granulometrias. A primeira dosagem realizada foi a da mistura Fresado+RL-1C, utilizando os teores de emulsão asfáltica de 0,5 % a 4,0 %, com incrementos de 0,5 %. O teor de 4,0 % foi utilizado nesta mistura, a fim de verificar se o acréscimo de ligante nessa ordem de grandeza provocaria melhorias nos parâmetros Marshall. Através dos resultados mostrados nas figuras a seguir, pode-se concluir que a estabilidade diminuiu significativamente quando foi adicionado 4,0 % de emulsão asfáltica e a massa específica aparente também sofreu redução. Principalmente em razão da queda da estabilidade, as demais misturas tiveram a estabilidade e a fluência determinadas até o teor de 3,0 %. Os resultados obtidos através do método Marshall foram estabilidade, fluência, massa específica aparente e volume de vazios.

4.3.1 Estabilidade e Fluência

A estabilidade e a fluência foram determinadas utilizando uma prensa Marshall eletrônica com aquisição automática de dados, que possibilita a obtenção da curva carga - deslocamento. Desta forma pode-se verificar o modo de ruptura das amostras da mistura. A Figura 34 apresenta quatro resultados de ensaios, mostrando, respectivamente, as curvas para cada tipo de mistura ensaiada com o teor de 2,5 % de ligante asfáltico.

Para as misturas Fresado+pó+RL-1C e Fresado+pó+ARE-75 observa-se uma definição de pico de ruptura, o mesmo não acontece para as misturas Fresado+RL-1C e Fresado+ARE-75. Sugerindo uma ruptura tipo frágil para as misturas com adição de pó, o que não se verifica para as misturas sem adição de pó. Este comportamento pode ser tomado como representativo de todas as amostras e demais teores de ligante asfáltico ensaiados. Verifica-se que as misturas em estudo representam as duas formas de ruptura previstas na norma ASTM D 6927 (carga com pico definido e carga sem definição de pico), como exposto anteriormente neste trabalho.

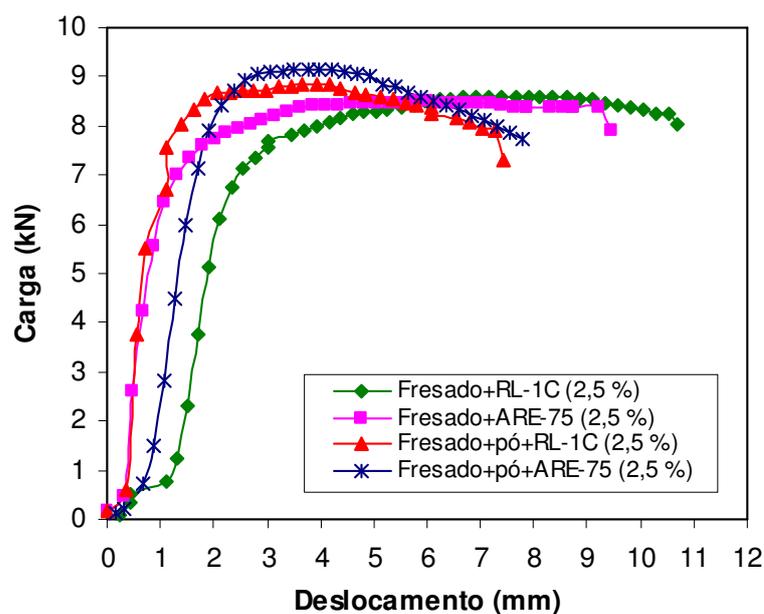


Figura 34: Exemplo de curvas obtidas através da prensa Marshall automatizada

A Figura 35 mostra os resultados de estabilidade obtidos para as quatro misturas asfálticas estudadas, em todos os teores de ligante empregados. Cada valor de estabilidade apresentado corresponde à média de três ensaios realizados. Observa-se que, com o aumento do teor de ligante asfáltico, ocorre uma diminuição nos valores de estabilidade. As curvas das misturas Fresado+pó+RL-1C e Fresado+pó+ARE-75 apresentaram um pequeno acréscimo antes do início da queda da estabilidade. Este comportamento não foi observado para as misturas sem adição de pó.

A estabilidade representa a resistência que uma mistura asfáltica oferece aos esforços de cisalhamento. A resistência é atribuída ao atrito entre as partículas do agregado e a coesão ocasionada pela presença do ligante. Na ausência de uma definição de limites para valores de estabilidade de misturas recicladas, os resultados foram comparados com os valores encontrados na revisão da literatura, obtidos de experiências anteriores, demonstrando compatibilidade entre os mesmos. Ressalta-se que estes resultados de estabilidade atendem ao valor mínimo exigido para misturas asfálticas densas a quente (5 kN), conforme norma DNIT 031/2006 - ES.

Os resultados de fluência obtidos são apresentados na Figura 36. Observa-se que os valores são muito semelhantes para as quatro misturas analisadas. A fluência mantém-se praticamente constante para todos os teores de ligante empregados, em torno de 2,5 mm. Este valor está de

acordo com os limites de aceitação constantes nas especificações usuais para misturas asfálticas densas a quente e misturas asfálticas a frio. A especificação DNER-ES 317/97 preconiza, para misturas tipo pré-misturado a frio, valores aceitáveis entre 2,0 mm e 4,5 mm. Através da fluência pode-se verificar, indiretamente, a elasticidade da mistura asfáltica.

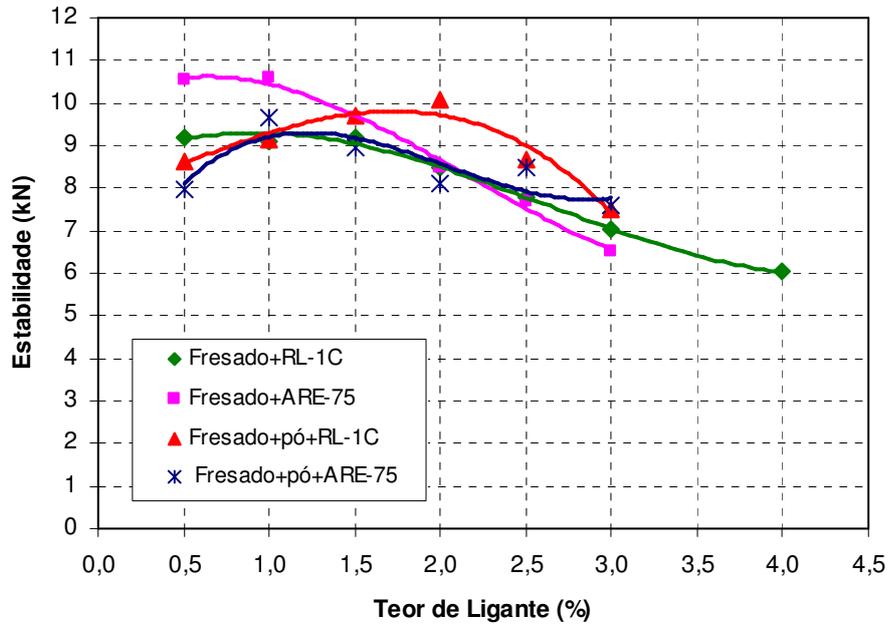


Figura 35: Estabilidade *versus* teor de ligante

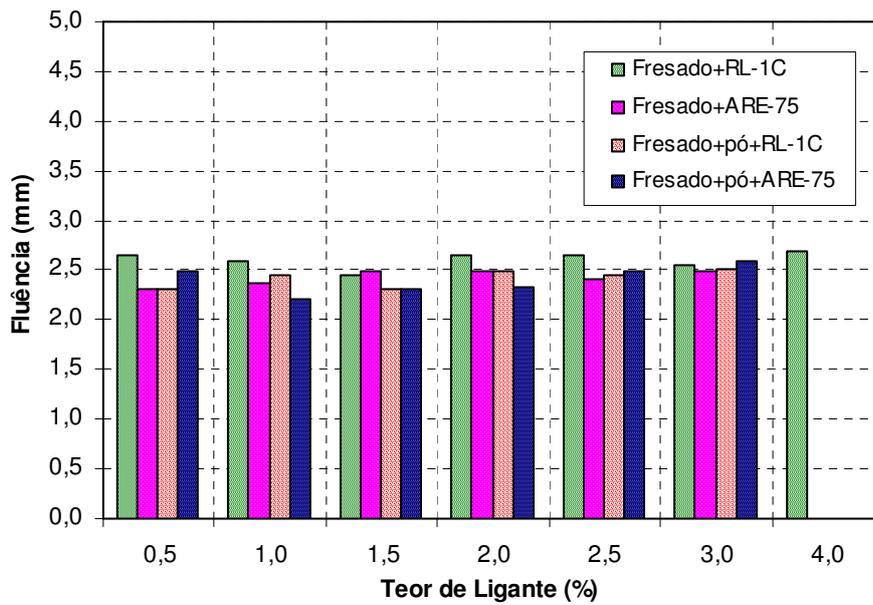


Figura 36: Fluência *versus* teor de ligante

4.3.2 Massa específica aparente

As massas específicas aparentes foram determinadas para todos os corpos-de-prova moldados, independentemente do ensaio que seria realizado posteriormente, com o intuito de verificar se as mesmas mantinham as características volumétricas ao longo do estudo. Portanto, os resultados aqui apresentados referem-se à média dos valores obtidos de todos os corpos-de-prova moldados. Foi utilizada, para o cálculo da média, a quantidade de seis a quinze valores de massa específica aparente para os diferentes teores de ligante empregados em cada mistura. A Figura 37 apresenta os valores obtidos para cada uma das quatro misturas asfálticas estudadas. Pode-se observar que as massas específicas apresentam uma pequena variação com o acréscimo de ligante, a não ser para a mistura Fresado+RL-1C que apresenta uma diminuição significativa na massa específica aparente quando se adicionam 4,0 % de ligante asfáltico. O que se percebe também é que para as misturas estudadas com a adição de pó, as massas específicas são mais elevadas do que para as misturas que não possuem pó de pedra na sua composição.

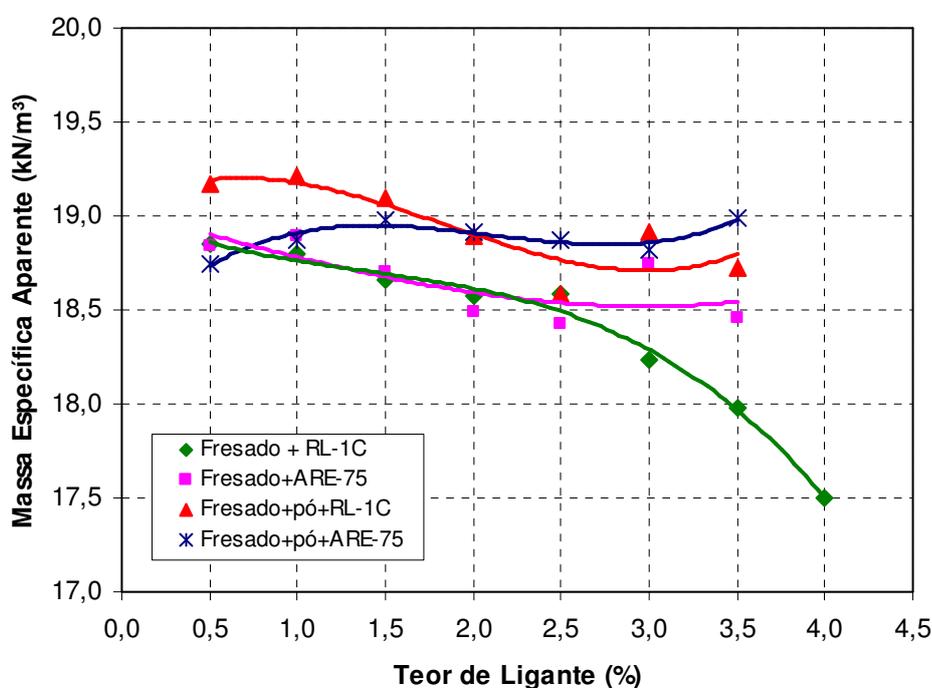


Figura 37: Massa específica aparente *versus* teor de ligante

4.3.3 Volume de vazios

Na Tabela 14 e Figura 38 são apresentados os valores de volumes de vazios calculados através das massas específicas máximas e massas específicas aparentes das respectivas misturas e teores de ligantes empregados. O volume de vazios praticamente não apresenta variação significativa com o aumento de teor de ligante. Observa-se que para as misturas com adição de pó de pedra, os valores de volume de vazios apresentam, em geral, uma pequena redução quando comparados com as misturas sem adição de pó.

Os resultados de volume de vazios apresentam-se mais elevados quando comparados com os descritos na revisão da literatura. Estes valores, porém, são comumente praticados em dosagens de misturas tipo pré-misturados a frio (SANTANA, 1993).

Tabela 14: Resultados de volume de vazios

Mistura	Teor de ligante (%)	Massa específica máxima (kN/m ³)	Massa específica aparente (kN/m ³)	Volume de vazios (%)
Fresado+RL-1C	0,5	24,54	18,85	23
	1,0	24,41	18,80	23
	1,5	24,32	18,66	23
	2,0	24,20	18,57	23
	2,5	24,10	18,59	23
	3,0	24,05	18,23	24
	3,5	23,89	17,98	25
Fresado+ARE-75	0,5	24,58	18,85	23
	1,0	24,42	18,89	23
	1,5	24,28	18,70	23
	2,0	24,18	18,49	24
	2,5	24,11	18,42	24
	3,0	24,03	18,74	22
Fresado+pó+RL-1C	0,5	24,67	19,17	22
	1,0	24,63	19,22	22
	1,5	24,51	19,09	22
	2,0	24,40	18,90	23
	2,5	24,28	18,59	23
	3,0	24,15	18,92	22
	3,5	24,02	18,73	22
Fresado+pó+ARE-75	0,5	24,73	18,75	24
	1,0	24,65	18,88	23
	1,5	24,57	18,98	23
	2,0	24,43	18,91	23
	2,5	24,28	18,88	22
	3,0	24,16	18,82	22
	3,5	24,00	18,99	21

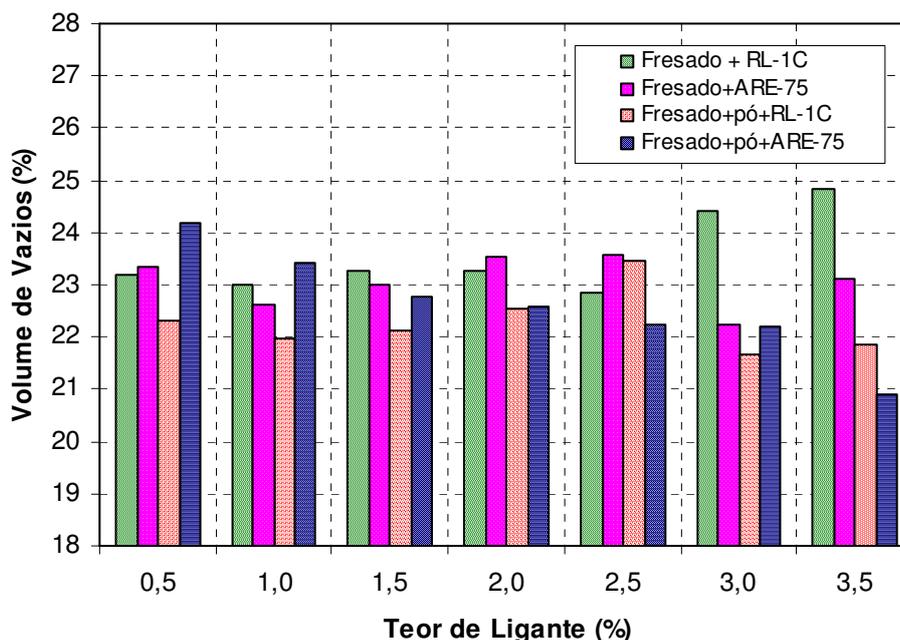


Figura 38: Volume de vazios *versus* teor de ligante

É pertinente considerar que quando se emprega uma mistura com alto teor de vazios, torna-se evidente a necessidade de execução de uma camada de revestimento impermeável sobre esta, a fim de manter a sua durabilidade.

4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados obtidos para a resistência à tração das misturas são apresentados na Figura 38. Cada valor de resistência apresentado corresponde à média de três ensaios realizados, na condição seca. Estes valores também estão apresentados na Tabela 16. Pode-se observar que a resistência à tração das quatro misturas aumenta com o acréscimo de ligante asfáltico, o que mostra o poder cimentante do ligante. As misturas Fresado+RL-1C e Fresado+pó+RL-1C apresentam os valores mais elevados de resistência à tração. Ainda, verifica-se que a mistura Fresado+ARE-75 apresenta-se menos sensível ao acréscimo de resistência entre os teores de ligante ensaiados.

Os valores encontrados de resistência à tração estão dentro do esperado para misturas recicladas. A especificação do DNIT para misturas recicladas a frio com espuma de asfalto estabelece uma resistência à tração mínima de 0,25 MPa, para emprego em camada de base do

pavimento. Pode-se observar, através da Figura 39, que para as misturas sem adição de pó e para a mistura Fresado+pó+RL-1C, teores de ligante maiores que 2,0 % atendem ao valor especificado. Já para a mistura Fresado+pó+ARE-75, a resistência de 0,25 MPa é atingida a partir do teor de ligante de 2,5 %.

Para fins comparativos, observa-se que os resultados são inferiores ao valor mínimo de 0,65 MPa, exigido pela especificação DNIT 031/2006 - ES, para as misturas asfálticas densas a quente.

Relata-se ainda que os valores de resistência não foram determinados com teores de ligante acima de 3,5 %, a fim de verificar se a resistência continuaria aumentando, porque teores mais elevados não são característicos de misturas que visam o reaproveitamento dos materiais, isto é, de misturas recicladas.

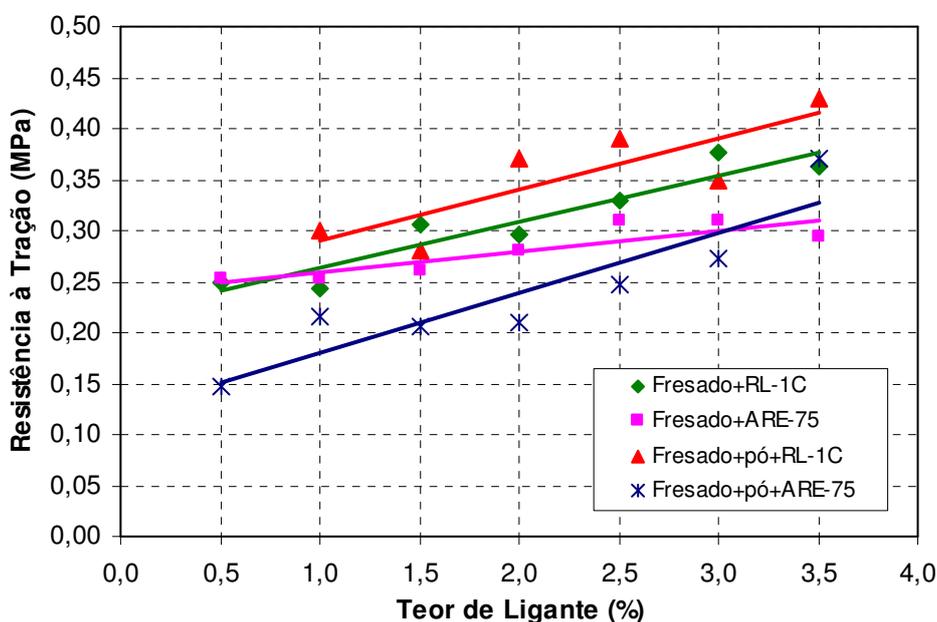


Figura 39: Variação da resistência à tração com o teor de ligante

4.5 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A Tabela 15 e a Figura 40 apresentam os valores de módulo de resiliência obtidos neste estudo. Estes valores correspondem à média de três determinações para cada teor de ligante e tipo de mistura ensaiada. Observa-se que para a mistura Fresado+pó+RL-1C, os valores são mais elevados do que os das outras três misturas. Esta mistura apresenta, também, um comportamento diferente das outras, mostrando uma curva que define uma região de pico entre os teores de ligante de 2,5 % e 3,0 %. Para as misturas sem adição de pó, os resultados de módulo de resiliência são praticamente iguais. Por outro lado, a mistura Fresado+pó+ARE-75 apresenta os menores resultados de módulo de resiliência.

É importante comentar que o módulo de resiliência está relacionado à rigidez da mistura asfáltica. A análise do módulo de resiliência não pode ser feita de forma direta. Valores maiores ou menores podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento. O que deve ser considerado é a compatibilidade de rigidez entre as camadas do pavimento. Também deve haver compatibilidade entre os valores de rigidez e de resistência dos materiais constituintes dessas camadas.

Salienta-se que os valores de módulo de resiliência e de resistência à tração da mistura são essenciais para o dimensionamento da estrutura do pavimento, quando se adotam métodos mecânicos que têm como base o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos das camadas constituintes do pavimento.

Tabela 15: Resultados de módulo de resiliência

Mistura	Teor de ligante (%)	Módulo de resiliência (MPa)
Fresado+RL-1C	0,5	3514
	1,0	3135
	1,5	3119
	2,0	2813
	2,5	3185
	3,0	3707
	3,5	3871
Fresado+ARE-75	0,5	3112
	1,0	3277
	1,5	2703
	2,0	2939
	2,5	3064
	3,0	3870
	3,5	3555
Fresado+pó+RL-1C	1,0	4022
	1,5	4145
	2,0	5086
	2,5	5370
	3,0	5415
	3,5	4056
Fresado+pó+ARE-75	0,5	1932
	1,0	3290
	1,5	2223
	2,0	2249
	2,5	2784
	3,0	3506
	3,5	3028

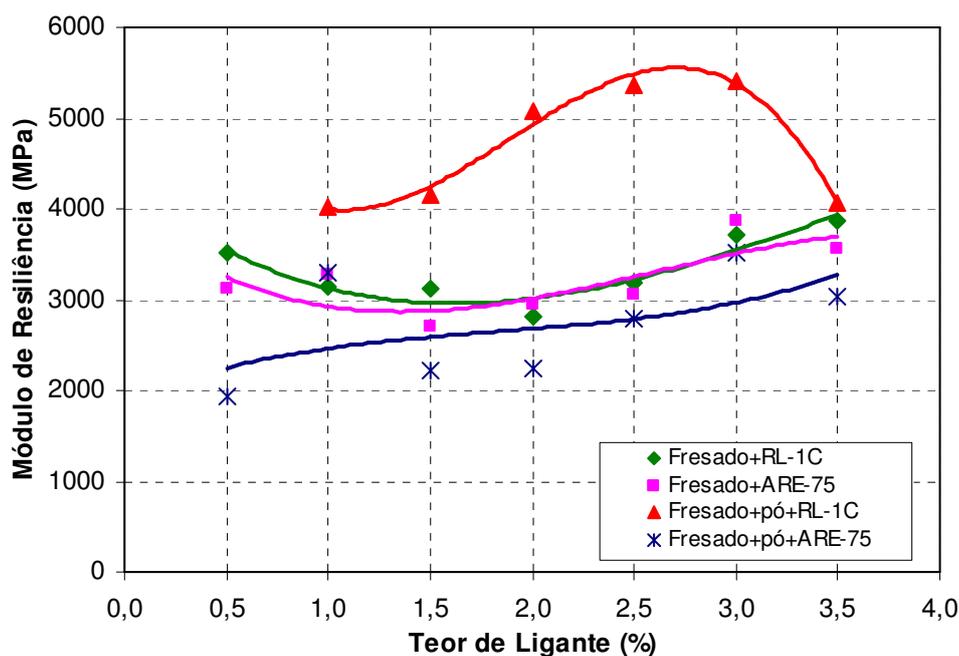


Figura 40: Variação do módulo de resiliência com o teor de ligante

4.6 EFEITO DA ÁGUA NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas estudadas foram submetidas à imersão em água com a finalidade de determinar a resistência à tração sob essa condição. Através da razão entre os valores de resistência à tração das amostras nas condições imersa e seca obtém-se a resistência à tração retida. A Tabela 16 apresenta os valores das resistências utilizadas para a determinação das resistências à tração retida.

Tabela 16: Resultados de resistência à tração retida

Mistura	Teor de ligante (%)	Resistência à tração condição seca RT ₁ (MPa)	Resistência à tração condição imersa RT ₂ (MPa)	Resistência à tração retida (RT ₂ / RT ₁)
Fresado+RL-1C	1,0	0,24	0,03	0,13
	1,5	0,31	0,07	0,23
	2,0	0,30	0,14	0,47
	2,5	0,33	0,19	0,58
	3,0	0,38	0,19	0,50
Fresado+ARE-75	1,0	0,25	0,09	0,36
	1,5	0,26	0,15	0,58
	2,0	0,28	0,09	0,32
	2,5	0,31	0,16	0,52
	3,0	0,31	0,13	0,42
Fresado+pó+RL-1C	1,0	0,30	0,06	0,20
	1,5	0,28	0,12	0,42
	2,0	0,37	0,19	0,51
	2,5	0,39	0,20	0,51
	3,0	0,35	0,26	0,74
Fresado+pó+ARE-75	1,0	0,22	0,09	0,41
	1,5	0,21	0,09	0,43
	2,0	0,21	0,11	0,52
	2,5	0,25	0,12	0,48
	3,0	0,27	0,10	0,37

Através da Figura 41 pode-se observar claramente, a queda de resistência que ocorre após a imersão das amostras em água. Conforme, especificado pelo DNIT, para misturas recicladas com espuma de asfalto, o valor mínimo de resistência à tração após imersão a 25 °C deve ser 0,15 MPa. Neste estudo, com a finalidade de empregar um método de ensaio simples e padronizado, as amostras foram submetidas a uma condição mais rigorosa de imersão, ficando imersas 24 horas a 60 °C, e mais duas horas a 25 °C. Entre as misturas estudadas, três delas atendem, em determinados teores de ligante, ao valor especificado. A mistura Fresado+pó+ARE-75 não atinge o valor de 0,15 MPa em nenhum dos teores. Também se verifica que para as misturas com RL-1C, ocorre um acréscimo mais significativo das

resistências com o aumento do teor, tanto na condição seca como imersa. Com isso, nota-se a importância do teor de ligante, visto que o mesmo melhora a coesão e adesão das misturas.

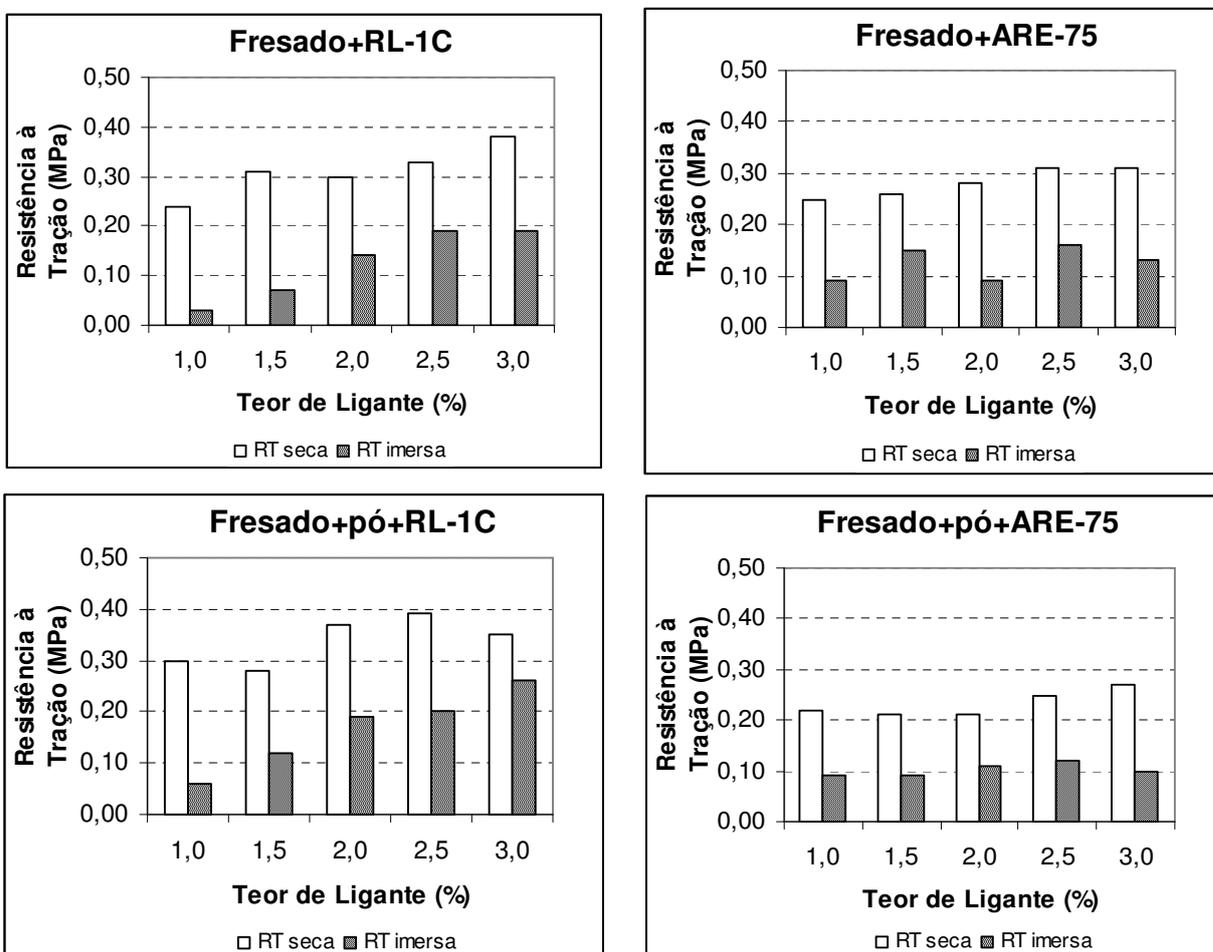


Figura 41: Resistência à tração seca e após imersão para diferentes teores de ligante e misturas

A Figura 42 mostra de uma forma ilustrativa os valores de resistência à tração retida. Em todas as misturas verifica-se que valores acima de 0,50 podem ser atingidos. O valor de resistência à tração retida mais elevado é de 0,74, para a mistura Fresado+pó+RL-1C, com o teor de 3,0 % de ligante.

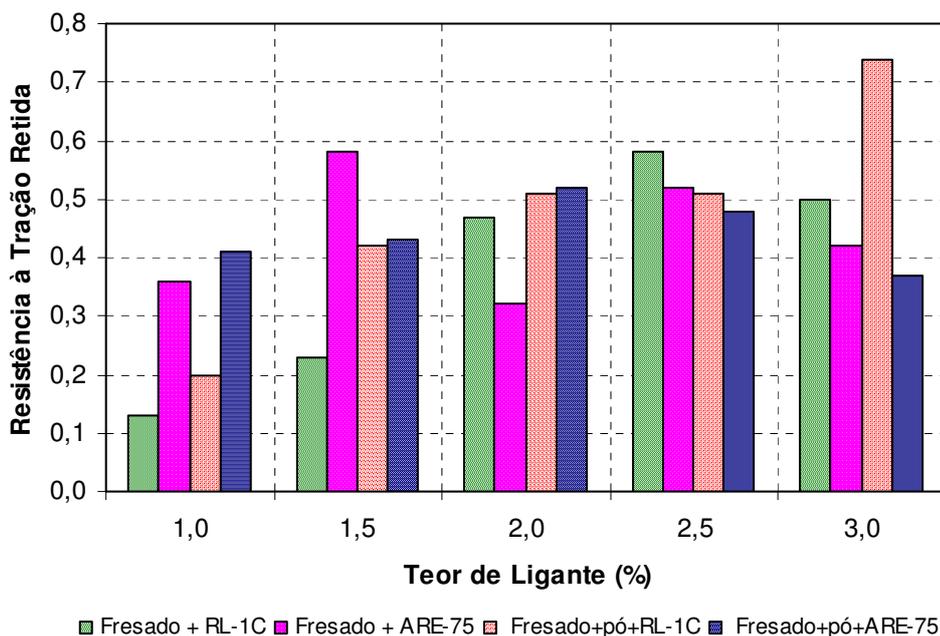


Figura 42: Variação da resistência à tração retida para diferentes teores de ligante e misturas

4.7 VERIFICAÇÃO DA GRANULOMETRIA E DO TEOR DE ASFALTO

A Tabela 17 apresenta os resultados dos ensaios de determinação do teor de asfalto e análise granulométrica, realizados com o objetivo de verificar a homogeneidade das amostras. Observa-se que os valores resultantes dos ensaios de granulometria após extração do asfalto e de determinação do teor de asfalto são compatíveis com os valores previstos na caracterização inicial e nas dosagens. Diante disso, constata-se que as amostras ensaiadas apresentam-se homogêneas. O material fresado atende a granulometria prevista, tanto antes da compactação como depois da compactação, como se pode observar através dos resultados, respectivamente, das amostras A e B e dos corpos-de-prova 11 e 15. Nota-se ainda que, para estes corpos-de-prova, os teores de ligante residual total, também resultaram nos valores previstos. O ligante residual total corresponde ao teor médio do CAP existente no material fresado (5,1 %) acrescido do ligante residual da emulsão RL-1C (0,9 %), para o CP 11 e do ligante residual do agente de reciclagem emulsionado ARE-75 (1,5 %), para o CP 15. Ressalta-se que ambos os ligantes adicionados possuem 60 % de resíduo, valor este considerado para a determinação do teor de ligante residual.

Tabela 17: Resultados da verificação da granulometria e do teor de asfalto

Análise granulométrica						
Peneira de malha quadrada		Porcentagem passante, em massa				
Mm	n° ou ”	Amostra A	Amostra B	CP 11	CP 15	Prevista
19,1	3/4”	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,7	1/2”	95,8	96,4	96,7	98,4	96,9
9,5	3/8”	91,9	94,4	91,4	93,8	93,4
4,76	n° 4	80,4	81,7	79,4	82,0	80,3
2,38	n° 8	66,0	67,1	64,9	66,9	64,1
1,19	n° 30	41,3	41,6	39,5	39,9	37,3
0,297	n° 50	26,5	28,6	27,3	26,8	24,4
0,149	n° 100	17,2	18,4	18,0	18,0	15,8
0,074	n° 200	14,1	14,7	14,5	14,7	12,6

Determinação do teor de asfalto (%)				
	Amostra A	Amostra B	CP 11 (1,5% RL-1C)	CP 15 (2,5% ARE-75)
Ensaio	4,9	4,9	6,0	6,5
Previsto	5,1	5,1	6,0	6,6

4.8 RESUMO

Para possibilitar a observação em conjunto dos principais fatores obtidos através das análises dos resultados, estes são apresentados resumidamente na Figura 43.

Propriedade	Fatores mais importantes obtidos das análises
Água de molhagem	- Não há variação significativa nos resultados de estabilidade, fluência, massa específica aparente e volume de vazios com o acréscimo de água de molhagem para a mistura avaliada (Fresado+RL-1C).
Massa específica máxima	- As misturas com adição de pó apresentam os valores mais elevados. - O tipo de ligante não provocou variação nos resultados.
Estabilidade	- Há redução com o aumento do teor de ligante para as quatro misturas.
Fluência	- Os valores são semelhantes para as quatro misturas e praticamente não se alteram com o acréscimo de ligante.
Massa específica aparente	- As misturas com adição de pó apresentam valores mais elevados.
Volume de vazios	- Não há variação significativa com o aumento do ligante para as quatro misturas. - Ocorre uma pequena redução para as misturas com adição de pó.
Resistência à tração	- Aumento com o acréscimo de ligante para as quatro misturas. - As misturas com emulsão RL-1C apresentam os maiores valores.
Módulo de resiliência	- A mistura fresado+pó+RL-1C apresenta os maiores valores. - A mistura fresado+pó+ARE-75 apresenta os menores valores.
Resistência à tração após imersão	- As misturas com emulsão RL-1C apresentam acréscimo mais significativo com o aumento de ligante.
Resistência à tração retida	- A mistura fresado+pó+RL-1C apresenta o maior valor de resistência à tração retida.

Figura 43: Resumo das análises dos resultados

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A realização do estudo de laboratório de misturas asfálticas recicladas a frio, utilizando emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta RL-1C e agente de reciclagem emulsionado ARE-75, permitiu a obtenção de resultados relativos a características Marshall, resistência à tração e módulo de resiliência. Na pesquisa também foi avaliado o efeito da adição de agregado virgem (pó de pedra) às misturas recicladas. Portanto, foram analisadas quatro misturas, denominadas Fresado+RL-1C, Fresado+ARE-75, Fresado+pó+RL-1C e Fresado+pó+ARE-75. Este capítulo apresenta as principais conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Os estudos realizados permitiram obter as principais conclusões, descritas a seguir:

- a) Os valores de resistência à tração e de módulo de resiliência das misturas avaliadas foram da mesma ordem de grandeza daqueles citados pela literatura para as misturas asfálticas recicladas a frio, aplicadas em camadas de base do pavimento ou em estudos de laboratório.
- b) As misturas estudadas com emulsão asfáltica catiônica RL-1C mostraram uma tendência de apresentar maiores valores de resistência à tração do que as misturas com agente de reciclagem emulsionado ARE-75.
- c) O módulo de resiliência para as misturas sem adição de pó não foi influenciado pelo tipo de ligante empregado. As misturas Fresado+RL-1C e Fresado+ARE-75 apresentaram valores de módulo de resiliência muito semelhantes. Já para as misturas com adição de pó, o tipo de ligante teve influência, pois os valores obtidos para a mistura com RL-1C foram superiores aos da mistura com ARE-75. Isto sugere a possibilidade de estar ocorrendo

alguma reação entre o pó de pedra virgem e o agente de reciclagem emulsionado ARE-75.

- d) O método de ensaio utilizado para a determinação das massas específicas máximas (ASTM D 2041) mostrou-se adequado para aplicação em misturas asfálticas recicladas a frio. Os resultados foram bastante sensíveis ao acréscimo do teor de ligante e à adição de pó nas misturas.
- e) A adição de pó nas misturas provocou um aumento nas massas específicas máximas para os dois tipos de ligante estudados (RL-1C e ARE-75). Já o tipo de ligante, não influenciou nos resultados das massas específicas máximas.
- f) O aumento da quantidade de água de molhagem para a dosagem preliminar realizada não proporcionou melhorias significativas nas características Marshall avaliadas.
- g) As quatro misturas avaliadas apresentaram valores de estabilidade comparáveis aos obtidos para as misturas asfálticas recicladas a frio com emulsão, conforme revisão da literatura. Esses valores atendem ao limite mínimo comumente utilizado para as misturas asfálticas densas a quente.
- h) O aumento do teor de ligante asfáltico, tanto para a emulsão RL-1C como para o agente de reciclagem ARE-75, praticamente não acarretou alteração nos valores obtidos de fluência para as misturas estudadas. As misturas apresentaram valores de fluência aceitáveis quando comparadas a misturas asfálticas densas a quente e a misturas asfálticas a frio.
- i) A adição de pó nas misturas asfálticas recicladas a frio conduziu a um aumento dos valores de massa específica aparente para os dois tipos de ligante estudados.
- j) As misturas asfálticas recicladas a frio apresentaram volume de vazios elevado, semelhante aos encontrados para as misturas tipo pré-misturado a frio. Com o aumento do teor de ligante não ocorreu variação significativa do volume de vazios. As misturas com adição de pó apresentaram, em geral, uma pequena redução do volume de vazios.

- k) O ensaio que avalia o efeito da água na resistência à tração das misturas asfálticas compactadas com aproximadamente 6 % de vazios (ASTM D 1075) apresentou resultados coerentes para as misturas asfálticas recicladas a frio estudadas.
- l) De um modo geral, a mistura fresado+pó+RL-1C apresentou os melhores resultados, evidenciados pelos maiores valores de resistência à tração. No entanto, a mistura fresado+RL-1C apresentou resultados semelhantes, podendo apresentar menor custo, em razão de não utilizar agregado novo.
- m) A reciclagem a frio de pavimentos é uma técnica que vem sendo cada vez mais utilizada, principalmente, pelas vantagens que proporciona como preservação do meio ambiente e possibilidade de redução de custos. O estudo de laboratório desenvolvido forneceu diversas informações sobre o comportamento de misturas recicladas a frio, contribuindo para a ampliação dos conhecimentos na área de reciclagem.

5.2 SUGESTÕES

Visando à evolução dos conhecimentos sobre o comportamento de misturas asfálticas recicladas a frio com emulsão ou agente de reciclagem emulsionado, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Avaliação da influência do tempo de cura nas características mecânicas de misturas asfálticas recicladas a frio.
- b) Verificação do comportamento quanto à deformação permanente de misturas asfálticas recicladas a frio, uma vez que misturas com volume de vazios elevado são mais suscetíveis a deformações permanentes.
- c) Investigação das possíveis reações entre o agregado virgem (pó de pedra) e o agente de reciclagem emulsionado.
- d) Estudo comparativo entre misturas de mesma granulometria, produzidas com diferentes porcentagens de material fresado.

- e) Estudo numérico com análise mecânica verificando tensões, deformações e deslocamentos, utilizando as misturas estudadas na estrutura do pavimento.
- f) Estudo de melhoradores de adesividade (cimento, cal, dope).
- g) Avaliação da condutividade hidráulica das misturas estudadas.
- h) Avaliação de custos das misturas estudadas.
- i) Execução de trechos experimentais empregando como base, misturas asfálticas recicladas a frio, previamente dosadas em laboratório. Através do monitoramento ao longo do tempo, tem-se a possibilidade de avaliar a evolução das características mecânicas desse tipo de mistura, além de outros parâmetros estruturais e funcionais. Durante a execução do trecho, pode ser verificado se os parâmetros definidos na dosagem de laboratório são adequados para as condições de campo.

REFERÊNCIAS

ABEDA. Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas: Soluções para Pavimentar sua Cidade**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsão asfáltica de ruptura lenta-Determinação da ruptura-Método da mistura com cimento**. ABNT/NBR 6297. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais betuminosos-Determinação do ponto de amolecimento-Método do anel e bola**. ABNT/NBR 6560. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsões asfálticas-Determinação da carga de partícula**. ABNT/NBR 6567. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsões asfálticas-Determinação do resíduo de destilação**. ABNT/NBR 6568. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsões asfálticas-Determinação da sedimentação**. ABNT/NBR 6570. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsões asfálticas catiônicas-Especificação**. ABNT/NBR 14594. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais asfálticos-Determinação do efeito de calor e do ar-Método da película delgada**. ABNT/NBR 14736. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais betuminosos-Determinação da viscosidade cinemática**. ABNT/NBR 14756. Rio de Janeiro, 2001.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage**. T 283-02. In: AASHTO ...Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing- Part 2B:Tests, 8p. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for compressive strength of bituminous mixtures**. D 1074-02. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v. 04.03, 4p. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for effect of water on compressive strength of compacted bituminous mixtures**. D 1075-96 (Reapproved 2000). In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, v 04.03, 2p. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus.** In: ASTM D 1559. 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for recovery of asphalt from solution by Abson method.** D 1856-95a. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v. 04.03, 4p. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures.** D 2041-00. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v. 04.03, 4p. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for percent air voids in compacted dense and open bituminous paving mixtures.** D 3203-94 (Reapproved 2000). In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v. 04.03, 3p. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures.** D 4123-82 (Reapproved 1995). In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v. 04.03, 4p. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for flat particles, elongated particles or flat and elongated particles in coarse aggregate.** D 4791-99. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v. 04.03, 4p. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for recovery of asphalt from solution using the rotary evaporator.** D 5404-02. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, v 04.03, 3p. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for classifying emulsified recycling agents.** D 5505-97 (Reapproved 2001). In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, v 04.03, 2p. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for Marshall stability and flow of bituminous mixtures.** D 6927-05. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, v 04.03, 8p. 2006.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Cold Mix.** Lexington, Manual Series N° 14 (MS-14). 1989a. 185p.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Cold-Mix Recycling.** Maryland, Manual Series N° 21 (MS-21). 1983. 68 p.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook.** USA. Manual Series N° 4 (MS-4). 1989b. 607p.

BONFIM, V; DOMINGUES A . A . Análise granulométrica de material resultante da fresagem de revestimentos asfálticos tendo em vista a reciclagem *in situ* a frio. In: 10º Congresso Ibero-Latinoamericano del asfalto. **Anais...** v. II. Sevilha, p. 1295-1308, 1999.

BONFIM, V. **Estudo da granulometria resultante da fresagem de revestimentos asfálticos com vistas à reciclagem *in situ* a frio.** São Paulo, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 179p.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos.** São Paulo, 2000. Ed. Fazendo Arte. 111p.

BONFIM, V; DOMINGUES A . A . Utilização de fresagem e reciclagem *in situ* a frio: alternativas na recuperação de pavimentos asfálticos. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação **Anais...** Cuiabá, p. 603-621, 1995.

CAMPOS, O. S. Serviços de reciclagem de pavimentos realizados nas rodovias da DERSA - Desenvolvimento Rodoviário S. A. In: 22ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** Maceió, p. 363-367, 1987.

CASTRO NETO, A. M.; BERNUCCI, L.B. Proposta de método de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente. In: 15º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo. **Anais** Rio de Janeiro, p.170-180, 2000.

CASTRO, L. N. **Reciclagem a frio *in situ* com espuma de asfalto.** Rio de Janeiro, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 156p.

CLERMAN, D. S. **Estudo laboratorial de misturas asfálticas a frio produzidas com incorporação de borracha de pneus.** Porto Alegre, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 125p.

CROSS, S. A. Determination of Superpave gyratory compactor design compactive effort for cold in-place recycled mixtures. **Transportation Research Record.** Washington, n.1819, p.152-160. 2003.

D'ANGELO J. A. Superpave mix design tests methods and requirements. In: **APWA International Public Works Congress.** Canadá, 2000. Disponível em: <<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/fulltext/apwa/apwasuperpave.pdf>> Acesso em: 20.05.2006.

DAU, F. N. F. **Uma avaliação técnico/econômica da reciclagem de revestimentos asfálticos a frio em usina em área urbana.** Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 144p.

DAVIDSON, J K.; BLAIS, C.; CROTEAU, J. A review of in-place cold recycling/reclamation in Canada. In: **Transportation Association of Canada Fall 2004 Meeting.** Canadá, 2004.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação do equivalente de areia.** DAER/RS-EL 006/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Análise granulométrica de agregados.** DAER/RS-EL 102/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação da abrasão *Los Angeles* de agregados.** DAER/RS-EL 103/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção de agregado graúdo.** DAER/RS-EL 105/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação do índice de lamelaridade.** DAER/RS-EL 108/01, Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação da viscosidade Saybolt Furol de emulsões asfálticas.** DAER/RS-EL 202/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação da penetração de materiais betuminosos.** DAER/RS-EL 203/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Peneiramento de emulsões asfálticas.** DAER/RS-EL 207/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação da ductilidade de materiais betuminosos.** DAER/RS-EL 208/01, Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação do resíduo por evaporação para emulsões asfálticas.** DAER/RS-EL 210/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação da densidade aparente de misturas betuminosas.** DAER/RS-EL 212/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação do teor de asfalto de misturas betuminosa utilizando o extrator por refluxo.** DAER/RS-EL 213/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Determinação do teor de asfalto de misturas betuminosa utilizando o extrator centrífugo.** DAER/RS-EL 214/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Pré-misturado a frio** DAER/RS-ES-P 19/91. Porto Alegre, 1991.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Agregado miúdo - determinação da densidade real**. DNER ME 084/95. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de pavimentação: DNER**. Rio de Janeiro, 2 ed., 1996, 320p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos: DNER**. Rio de Janeiro, 1998, 242p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Mistura betuminosa a frio com emulsão asfáltica - Ensaio Marshall**. DNER ME 107/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Mistura Betuminosas - Determinação do Módulo de Resiliência**. DNER-ME 133/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas Betuminosas - Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**. DNER-ME 138/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Pavimentação - reciclagem de pavimento a frio *in situ* com espuma de asfalto**. DNER-ES 405/2000. Rio de Janeiro, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico**. DNIT 031/2006 - ES. Rio de Janeiro, 2006.

FONSECA, P. J. V. A reciclagem de pavimentos rodoviários. In: **6ª Semana das Engenharias**. Portugal, 2002. Disponível em: <<http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>> Acesso em 17.07.2006.

GRECA ASFALTOS. **Reciclagem a frio - uma opção econômica e ecológica de restauração de pavimentos**. Texto informativo da empresa Greca Asfaltos. Paraná, 2003.

HALL, K. T. *et al.* Rehabilitation strategies for highway pavements. National Cooperative Highway Research Program. Web document 35 (Project C1-38). **Transportation Research Board**, Washington, 136p., 2001.

HODGKINSON A.; VISSER A. T. The role of fillers and cementitious binders when recycling with foamed bitumen or bitumen emulsion. In: **8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa**. Sun City, 2004.

HOLTZ K., EIGHMY T. T. **Scanning European Advances in the Use of Recycled Materials in Highway Construction**. FHWA Public Roads. vol. 64 n. 1. 2000. Disponível em: <http://www.tfhrc.gov/pubrds/julaug00/recycscan.htm> Acesso em 17.12.05.

HUFFMAN, J. E. Cold in-place recycling for the rehabilitation of asphalt pavements. In: **Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA) Users Seminar**. Austin, 1995.

IBARRA, J. A. **Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta**. Barcelona, 2003. (Tesis doctoral) - Universidad Politécnica de Cataluña. 232p.

IBP. **Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos**. Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, 1999. 75p.

INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. **Wet track abrasion loss**. ISSA-TB N° 100/90. Annapolis, 1990.

IPIRANGA ASFALTOS. **Projeto de reciclagem a frio**. Estudo técnico n 24/97. São Paulo, 1997.

JENKINS, K. J. **Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen**. Stellenbosch, 2000. Dissertation (Doctor of Philosophy) - University of Stellenbosch. 368p.

JOHNSON. Cold in place finds its place on roadways: New emulsion technology boosts CIR process. In: **WALLACE, Jai. Entrevista Asphalt Contractor**. USA, [200-?]. Disponível em: <http://www.forconstructionpros.com/pubarchives/Asphalt-Contractor/2FCP2005>. Acesso em: 15.08.2005.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **FHWA Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments**. Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation. FHWA-SA-98-042. Washington, 1997.

LEE, K. W.; BRYTON, T. E; HUSTON, M.. **Development of performance based mix design for cold in-place recycling (CIR) of bituminous pavements based fundamental properties**. Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation. FHWA-IF-05-014. Washington, 2002.

LEITE, L. F. M. **Estudo de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. Rio de Janeiro, 1999. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

LIBERATORI, L. A.; CONSTANTINO, R. S.; TUCHUMANTEL JR.. Cold in situ recycling - Reciflex® - at SP/147. A brand new experience. In: **International. Symposium on Pavement Recycling**. São Paulo, cd-rom, 2005.

LIDA A. **Effects of added softening agents upon the behavior of cold recycled asphalt mixtures.** Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation.. FHWA/IN/JHRP-80-13, FHA, Washington, 1980.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997. 380p.

MELLO, L. G.; CAMERATO, C. R. Reciclagem asfáltica da via Anhanguera - Relato de uma experiência pioneira. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** Cuiabá, p 291-318, 1995.

MODERN ASPHALTS: Revista semestral. **Taking the sustainable road.** Modern Asphalts n. 12, 2003. Disponível em:<<http://www.modernasphalts.com/ISSUES/PDF/MA12.pdf>>. Acesso em: 03.08.2005.

MOMM, L.; DOMINGUES, F. A. A. Reciclagem de pavimentos a frio *in situ* superficial e profunda. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** Cuiabá, p 571-601, 1995.

MOREIRA, H. S. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas com diferentes teores de agregado fresado incorporado e diferentes modos de compactação.** Fortaleza, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará. 94p.

MOTTA, L. M. *et al.* **Princípios do projeto e análise Superpave de misturas asfálticas: tradução comentada.** Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, 1996. 136p.

MOTTA, L. M. *et al.* Trecho de reciclagem a frio na BR-393- Avaliação após 8 anos da implantação. In: 16º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo. IBP03102. **Anais...** Rio de Janeiro, 2002.

MUNCY, H. W. **Asphalt Emulsions.** Philadelphia: Editor ASTM STP 1079,1990. 111p.

OGURTSOVA, J.; BIRMAN S.; COELHO V. **Concreto Asfáltico.** Boletim técnico n. 8. DER Paraná. Curitiba, 1995.

O'LEARY, M. D.; WILLIAMS, R. D. In situ cold recycling of bituminous pavements with polymer-modified high float emulsions. **Transportation Research Record.** Washington, n.1342, p.20-25. 1993.

OLSSON, K.; LILLBROANDA, U.; REDELIUS, P. **Improved cold recycling of asphalt - Highway & Transportation,** p. 9-10,1999.

PARANHOS, C. A. S.; TUCHUMANTEL JR, O. Reciclagem a frio. In: 11º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo. **Anais...** Rio de Janeiro, p-255-288, 1992.

PINTO, I. E. **Estudo das características físicas e mecânicas de misturas recicladas com espuma de asfalto.** São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 209p.

PINTO, S; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro: Editora Copiarte, 2002. 380p.

PINTO, S. *et al.* Pré-misturado a frio reciclado *in situ*. In: 12º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo. **Anais...** Rio de Janeiro, 1994.

RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT USER GUIDELINE. USA, [1998?]. Disponível em <<http://www.tfrc.gov/hnr20/recycle/wastw/rap133.htm>. Acesso em: 05.06.2006

ROGGE, D. F. Et al. Use of asphalt emulsions in-place recycling: Oregon experience. **Transportation Research Record**. Washington, n.1342, p. 1-8. 1993.

SALOMON, A.; NEWCOMB, D. E. **Cold in place recycling literature review and preliminary mixture design procedure**. Minnesota Department of Transportation -Final Report MMN/RC - 2000-21. Minncapolis, 2000.

SANTANA, H. **Manual de pré-misturados a frio**. Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, 1993. 298p.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Editora PINI, 1997. 746p.

SERFASS, *et al.* **Influence of curing on cold mix mechanical performance**. In: 6th International RILEM Symposium PTEBM 03. Zurich, 2003.

SHELL BITUMEN. **The Shell bitumen handbook**. London: Thomas Telford Publishing, 2003. 460p.

SHEROCMAN, J. A. Cold in-place recycling of low-volume roads. **Transportation Research Record**. Washington, n.898, p. 308-315. 1983.

SILVEIRA, M. A.; MOREIRA, H. S.; SOARES, J. B. **Estudo de dosagem de misturas asfálticas recicladas a frio no Ceará**. In: 11ª Reunião Anual de Pavimentação Urbana. Porto Alegre, cd-rom, 2002.

SUZUKI, C. Y. Structural analysis of a test section using cold in place recycling. In: **International Symposium on Pavement Recycling**. São Paulo, cd-rom, 2005.

TRB. **Transportation Research Board**. NCHRP. National Cooperative Highway Research Program: Research Results Digest n. 253. Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: guidelines. Washington, 2001.

TUCHUMANTEL JR., O. **Reciclagem de Pavimentos - Conceitos, Interpretações e Controle**. Betunel Indústria e Comércio Ltda. São Paulo, 1998. 21 p.

USACE. **Cold mix recycling**. United States Army Corps of Engineers, UFGS 02965. Washington, 19p, 2005.

WIRTGEN GmbH. **Misturas de materiais a frio: preparação e processos.** Windhagen, 18p., 2004.

WIRTGEN GmbH. **Relação de trechos executados no Brasil desde 1997.** São Paulo, 2p., [2000?].

WIRTGEN GmbH. **Wirtgen Cold Recycling Manual.** Windhagen, 2004, 248p.

ZEBALLOS, G. T.; SAÉZ, G. G. Reciclado en frío de pavimentos asfálticos. Diseño de mezclas en base a emulsiones. In: 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del asfalto. **Anais...** v II. Sevilha, p. 1201-1214, 1999.