



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

FABIANO DA SILVA JORGE

**COMPORTAMENTO DE MATERIAL FRESADO COM
ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND E EMULSÃO**

Passo Fundo

2014

FABIANO DA SILVA JORGE

COMPORTAMENTO DE MATERIAL FRESADO COM ADIÇÃO
DE CIMENTO PORTLAND E EMULSÃO

Orientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Passo Fundo

2014

FABIANO DA SILVA JORGE

COMPORTAMENTO DE MATERIAL FRESADO COM ADIÇÃO
DE CIMENTO PORTLAND E EMULSÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Data de aprovação: 17 de outubro de 2014.

Os componentes da Banca Examinadora abaixo aprovaram a Dissertação.

Dr. Francisco Dalla Rosa
Orientador

Dr. Luciano Pivoto Specht
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Dr. Antonio Thomé
Universidade de Passo Fundo - UPF

Dr. Pedro Domingos Marques Prietto
Universidade de Passo Fundo - UPF

Passo Fundo
2014

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me dá, dia-a-dia, a serenidade e paciência na busca de novas conquistas.

Agradeço o apoio e compreensão de minha família em todos os momentos difíceis que tive para prosseguir e concluir este trabalho, em especial aos meus pais Acísio Espindula Jorge e Carolina das Graça da Silva, que são os meus maiores exemplos de vida, de fé e de persistência em alcançar os objetivos.

Agradeço ao meu tio Antonio Gustavo Jorge, que é um exemplo de que é possível conciliar a família, o trabalho e os estudos.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Francisco Dallarosa, pela paciência, dedicação, questionamentos, intervenções, considerações e incentivo até o fim do trabalho. Aproveito para agradecer também pela grande amizade que a pesquisa nos proporcionou.

Agradeço aos professores Dr. Antônio Thomé, Dr. Pedro Domingos Marques Prietto e Dr. Luciano Pivoto Specht pelas palavras motivadoras e questionamentos, pois com elas amadureci meu trabalho.

Agradeço aos colegas do laboratório de pavimentação de Capão do Leão pela ajuda e apoio na execução dos ensaios práticos.

Agradeço à SBS Engenharia e Construções S.A. por permitir o uso do laboratório para a realização dos ensaios necessários à pesquisa.

Agradeço à Betunel S.A. por fornecer a emulsão estabisol para a pesquisa. Agradeço ainda a atenção dada pelo Eng. Osvaldo Tuchumantel Junior que sempre esteve à disposição para dirimir quaisquer dúvidas e dar sugestões.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial aos professores D.Sc. Jorge Augusto Pereira Ceratti e ao PhD. Lélío Antonio Teixeira Brito, por permitir que fossem realizados os ensaios necessários para a pesquisa. Agradeço ainda o auxílio dos acadêmicos, Larissa Montagner de Barros e Daniel Pinheiro Fernandes.

Agradeço à Universidade de Passo Fundo por me proporcionar mais esta etapa na vida profissional e pessoal alcançada.

Por fim, quero deixar registrado o meu “Muito Obrigado” a todos que de uma maneira ou de outra me auxiliaram nesta nova conquista. Certamente muitas pessoas contribuíram para o amadurecimento da pesquisa, para rever conceitos, para o entendimento dos resultados e até para mudanças de opiniões ao longo do trabalho. Que todos se sintam agradecidos.

RESUMO

No Brasil, a reciclagem de pavimentos flexíveis é uma das boas alternativas para a restauração de uma malha rodoviária antiga, deficitária e que não atende mais aos esforços a que são solicitados. A reciclagem a frio, por contribuir mais para a preservação ambiental e ser a técnica mundialmente mais executada e estudada, foi o objeto deste estudo. Pesquisas e obras já executadas no país também mostram que a reciclagem, além de recuperar o pavimento, pode agregar resistência na estrutura quando adicionado um ou mais agentes estabilizadores. Neste contexto, a presente dissertação de mestrado propôs o estudo das propriedades mecânicas com a adição de estabilizadores na reciclagem de pavimentos flexíveis. O estudo foi realizado com amostras de materiais oriundas da região de Pelotas, no sul do estado do Rio Grande do Sul, na rodovia federal BR-116. Foram coletadas amostras de uma camada de 15,0 cm de pavimento fresado contendo aproximadamente 5,0 cm de revestimento betuminoso e 10,0 cm de base de brita graduada. Por meio de ensaios e a partir de uma amostra de referência, foi analisado o comportamento mecânico adquirido para as amostras com adição simples de cimento, adição simples de emulsão asfáltica e ainda, com a adição combinada de emulsão asfáltica e cimento. A Resistência à Tração para misturas com adição simples de cimento obtiveram resultados cerca de dez vezes maiores quando comparados às misturas com adição simples de emulsão. O Módulo de Resiliência para misturas com adição simples ou combinada de cimento se mostraram frágeis para estruturas flexíveis, enquanto que as misturas com adição simples de emulsão teve um melhor desempenho. Concluiu-se que na condição de pavimento flexível a escolha mais adequada é a mistura com adição de emulsão, enquanto que na condição de pavimento invertido as melhores escolhas são as misturas com adição de cimento e com adição combinada de emulsão e cimento. Todas as misturas com adição obtiveram ganho no equivalente estrutural e conseqüentemente uma estrutura total menor, tornando a reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de agentes estabilizadores uma alternativa, ambientalmente, tecnicamente e economicamente viável. Concluiu-se ainda que o ideal fosse utilizar um software para a verificação das fadigas compatíveis com pavimentos flexíveis, semirrígidos e pavimentos invertidos.

Palavras-chave: Material Fresado. Reciclagem. Comportamento Mecânico.

ABSTRACT

In Brazil, the recycling of flexible pavements has been a good alternative for the restoration of an old and deficient roadway network that does not respond to the required efforts any more. The object of this study was the cold recycling because it contributes more for the environmental preservation and it is the most executed and studied technique worldwide. Researches and pieces of work executed in our country have also shown that this recycling, besides restoring the pavement, aggregates resistance to the structure when one or more stabilizers are added to that. In this context, the present essay proposes the study of mechanical features with the addition of stabilizers in the recycling of flexible pavements. The study was developed with samples of materials from the federal motorway BR-116, in the region of Pelotas, a city in the south of the state of Rio Grande do Sul. Samples of a layer of 15,0 cm from recycled pavement which contained approximately 5,0 cm of bitumen coating and 10,0 cm of graded gravel were collected. The mechanical behaviour was analysed through testing reference samples with a simple addition of cement, asphalt emulsion and even with a combined addition of both elements. The Indirect tensile Strength for mixtures of simple addition of cement got ten times greater results compared to the mixtures with simple addition of emulsion. The Resilience Module for simple or combined additions of cement was proved fragile for flexible structures, while those mixtures with simple emulsion addition had a better performance. We can imply that, for flexible pavements, the most appropriate choice is the mixture with addition of emulsion, while, in inverted pavements, the best choices are the mixtures with addition of cement and those combined with emulsion and cement. All the mixtures with additions showed an advantage in the structural equivalent and, consequently, in a smaller structure, turning the recycling of flexible pavements with addition of stabilizer agents an environmental alternative, technically and economically viable. It was also concluded that the use of a software to verify the fatigue compatible to the flexible, semi-rigid and inverted pavements would be ideal for this kind of job.

Key words: Material Milled. Recycling. Mechanical Behavior.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Considerações Iniciais.....	16
1.2 Problema da Pesquisa	16
1.3 Justificativas.....	17
1.4 Objetivos.....	19
1.4.1 Objetivo Geral.....	19
1.4.2 Objetivos Específicos.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 A Reciclagem de Pavimentos Flexíveis.....	20
2.2 Tipos de Reciclagem.....	21
2.2.1 Reciclagem a Quente	24
2.2.1.1 Reciclagem a Quente em Usina.....	24
2.2.1.2 Reciclagem a Quente <i>in situ</i>	25
2.2.2 Reciclagem a Frio	26
2.2.2.1 Reciclagem a Frio em Usina.....	27
2.2.2.2 Reciclagem a Frio <i>in situ</i>	27
2.2.3 Reciclagem Profunda	29
2.3 Aspectos Técnicos.....	30
2.4 Vantagens e Desvantagens da Reciclagem de Pavimentos.....	32
2.4.1 Reciclagem a quente.....	32
2.4.2 Reciclagem a frio	33
2.5 Agentes de Reciclagem.....	34
2.5.1 Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP.....	35
2.5.2 Cal	36
2.5.3 Cimento Portland	36
2.5.4 Emulsão Asfáltica.....	37
2.6 Experiências na Reciclagem de Pavimentos Flexíveis.....	38
2.6.1 Rodovia BR-290/RS (Pista Sul).....	39
2.6.2 Rodovia PR-151 (Ponta Grossa a Jaguariaiva).....	40
2.6.3 Rodovia SP-330 (Anhanguera)	41

2.6.4 Rodovia BR-277 (São Luis do Purunã a Campo Largo).....	42
2.6.5 Rodovia SP-147 (Piracicaba a Limeira)	43
2.6.6 Rodovia SC-303 (BR-282 - Joaçaba a Capinzal).....	43
2.6.7 Rodovia SC-303 (SC-135 - Videira a Tangará).....	44
2.6.8 Rodovia SC-480 (São Lourenço do Oeste a São Domingos)	44
2.6.9 Rodovias RS-122 (Ipê – Localidade de Samuel) e RSC-453 - Rota do Sol (Caxias do Sul – Lajeado Grande).....	44
2.6.10 Rodovia BR-116 – km 416 (Camaquã/RS)	45
2.7 Mecânica dos Pavimentos	45
2.7.1 Métodos mecanísticos.....	47
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
3.1 Fluxograma do experimento	49
3.2 Local da coleta e do estudo	49
3.3 Caracterização dos Materiais	51
3.3.1 Material Fresado	51
3.3.2 Emulsão	55
3.3.3 Cimento Portland	55
3.4 Dosagem Marshall da Mistura Reciclada	56
3.4.1 Água de Molhagem.....	56
3.4.2 Moldagem dos corpos-de-prova.....	57
3.4.2.1 Secagem do material fresado	59
3.4.2.2 Fracionamento do material fresado.....	59
3.4.2.3 Pesagem das amostras	59
3.4.2.4 Adição da água de molhagem	59
3.4.2.5 Homogeneização e adição do agente estabilizante.....	60
3.4.2.6 Umidade para a compactação	61
3.4.2.7 Compactação dos corpos-de-prova.....	62
3.4.3 Determinação da massa específica aparente	63
3.4.5 Volume de vazios	64
3.4.6 Estabilidade e Fluência	65
3.5 Propriedades mecânicas.....	66
3.5.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral	66
3.5.2 Módulo de Resiliência	67
3.6 Análise Computacional – Programa EVERSERIES	67

3.6.1 Dados de entrada para cada mistura.....	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1 Água de Molhagem	71
4.2 Determinação da massa específica aparente	74
4.3 Determinação da massa específica máxima medida	75
4.4 Volume de Vazios	76
4.5 Estabilidade e Fluência	77
4.6 Definição do Teor Ótimo de Projeto (TOP)	80
4.7 Resistência à tração por compressão diametral.....	81
4.8 Módulo de resiliência	82
4.9 Resultados do programa EVERSTRESS 5.0	87
4.9.1 Resultados para ESRD de 8,2tf.....	88
4.9.2 Resultados para ESRD de 10tf.....	89
4.10 Análise dos resultados	90
5 CONCLUSÕES FINAIS	93
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Operação de uma usina de asfalto gravimétrica.	25
Figura 2 – Operação de uma usina de asfalto volumétrica.	25
Figura 3 – Reciclagem a quente <i>in situ</i> nos EUA.	26
Figura 4 – Reciclagem a Frio em Usina.....	27
Figura 5 – Reciclagem a Frio <i>in situ</i>	28
Figura 6 – Recicladora WR 2500 SK	28
Figura 7 – Reciclagem a Frio <i>in situ</i> – Esquema de Equipamentos.	29
Figura 8 – Reciclagem Profunda de Pavimentos Flexíveis.	29
Figura 9 – Composição dos cimentos Portland.....	37
Figura 10 – Execução da Reciclagem na SC-303.	44
Figura 11 – Execução da compactação.....	45
Figura 12 – Fluxograma da pesquisa.	49
Figura 13 – Processo de fresagem.....	50
Figura 14 – Parte da amostra de material fresado.	51
Figura 15 – Gráfico da amostra enquadrada na Faixa “A” do DNIT.	53
Figura 16 – Gráfico da amostra enquadrada na Faixa “A” da ARRA.....	54
Figura 17 – Preparação da mistura.....	57
Figura 18 – Homogeneização da mistura.....	57
Figura 19 – Moldagem dos corpos-de-prova.....	58
Figura 20 – Adição de emulsão.....	60
Figura 21 – Adição de emulsão.....	61
Figura 22 – Compactador mecânico Marshall.....	62
Figura 23 – Corpos-de-prova preliminares extraídos dos moldes.....	63
Figura 24 – Corpos-de-prova sendo parafinados.....	63
Figura 25 – Conjunto de equipamentos do método RICE.....	64
Figura 26 – Corpo-de-prova sendo ensaiado na prensa Marshall.	65
Figura 27 – Equipamento para ensaio de RT.	66
Figura 28 (a) – Compressão diametral. / Figura 28(b) – Compressão Confinada.....	67
Figura 29 – Everstress 5.0 - Entrada de Dados.....	68
Figura 30 – Configurações para inserir no Everstress 5.0.....	70

Figura 31 – Gráficos com resultados para a adição de 3% de emulsão: a) Volume de Vazios; b) Densidade Aparente; c) Estabilidade; d) Fluência.....	71
Figura 32 – Gráficos com resultados para a adição de 3% de cimento: a) Volume de Vazios; b) Densidade Aparente; c) Estabilidade; d) Fluência.....	72
Figura 33 – Gráficos com resultados para a adição de 3% de cimento e 3% de emulsão: a) Volume de Vazios; b) Densidade Aparente; c) Estabilidade; d) Fluência.	73
Figura 34 – Gráfico das massas específicas aparentes.....	75
Figura 35 – Gráfico das massas específicas máximas medidas.	76
Figura 36 – Variação do volume de vazios com o acréscimo do agente estabilizante.....	77
Figura 37 – Gráfico da estabilidade das misturas.....	78
Figura 38 – Gráfico da fluência das misturas.....	79
Figura 39 – Ensaio na prensa Marshall.	80
Figura 40 - Ensaio de RT no laboratório.	82
Figura 41 - Módulo de resiliência dos materiais sem adição dos agentes aglutinantes ...	84
Figura 42 - Módulos de resiliência comparativo de agregados brasileiros e do estudo...	85
Figura 43 - Módulo de resiliência do material com e sem adição de agente aglutinante.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Configurações para o software.....	68
Tabela 2: Dados de entrada relativos às configurações.	69
Tabela 3: Resultados do Ensaio de Compactação Proctor.	74
Tabela 4: Volume de Vazios das misturas.....	77
Tabela 5: Estabilidade das misturas.....	78
Tabela 6: Fluência das misturas.....	79
Tabela 7: Resultados de Resistência à Tração.	81
Tabela 8: Resultados de Módulo de Resiliência.....	82
Tabela 9: Coeficientes obtidos a partir do modelo $MR = k1.\theta^{k2}$	85
Tabela 11: Módulos de resiliência comparativo de agregados brasileiros e do estudo....	86
Tabela 11: Resultados para ESRD de 8,2tf.....	88
Tabela 12: Resultados para ESRD de 10tf.....	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Tipos de Reciclagem.....	22
Quadro 2: Tipos de Reciclagem.....	23
Quadro 3: Guia para a seleção de Métodos para Reciclagem.....	31
Quadro 4: Critérios para adotar ou não a Reciclagem a Frio.....	32
Quadro 5: Comparação entre Consumo de Energia.	33
Quadro 6: Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo – Classificação por Penetração.....	35
Quadro 7: Especificações Químicas da Cal.....	36
Quadro 8: Especificações Físicas da Cal.	36
Quadro 9: Especificações de Emulsões Catiônicas.	38
Quadro 10: Características Executivas da Rodovia.	39
Quadro 11: Resultados Obtidos.....	39
Quadro 12: Características Executivas da Rodovia.	40
Quadro 13: Resultados dos Ensaios.	40
Quadro 14: Características Executivas da Rodovia.	41
Quadro 15: Características Executivas - Complementar.....	41
Quadro 16: Resultados dos Ensaios.	42
Quadro 17: Resultados dos Ensaios.	42
Quadro 18: Resultados dos Ensaios.	43
Quadro 19 – Faixas Granulométricas para base estabilizada.....	52
Quadro 20 – Análise granulométrica na faixa do DNIT.....	52
Quadro 21 – Faixas Granulométricas segundo a ARRA.....	53
Quadro 22 – Análise granulométrica na faixa da ARRA.....	54
Quadro 23 – Resultados obtidos em laboratório.....	55
Quadro 24 – Resultado obtido no Ensaio de Finura.....	55
Quadro 25: Determinação da Massa Específica Aparente (MEA).	75
Quadro 26: Determinação da Massa Específica Máxima Medida.....	76

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABPC	Associação Brasileira dos Produtores de Cal
ARE	Agente de Reciclagem Emulsionado
ARRA	Asphalt Recycling and Reclaiming Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul
DEINFRA	Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina
DMT	Massa Específica Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ECOSUL	Empresa Concessionária de Rodovias do Sul S.A.
ESRD	Eixo Simples de Roda Dupla
FHWA	Federal Highway Administration
Gmb	Massa Específica Aparente
MEA	Massa Específica Aparente
MEM	Massa Específica Máxima
MR	Módulo de Resiliência
RAP	Pavimento Asfáltico Recuperado
RBV	Relação Betume-Vazios
RF	Reciclagem a Frio
RFI	Reciclagem a Frio In Situ
RFUF	Reciclagem a Frio em Usina Fixa
RP	Reciclagem Profunda
RIC	Reciclagem Intermediária de Capa
RQI	Reciclagem a Quente In Situ
RL	Ruptura Lenta

RM	Ruptura Média
RRS	Reciclagem e Recapeamento Simultâneo
RSC	Reciclagem Superficial de Capa
RT	Resistência à Tração
TOF	Teor Ótimo de Fluido
TOP	Teor Ótimo de Projeto
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USACE	Corpo de Engenheiros do Exército Americano
VMD	Volume Médio Diário
WSDOT	Washington State Department of Transportation

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A pavimentação de rodovias no Brasil tem evoluído significativamente em processos e métodos de execução. Porém, poucas alternativas têm trazido um retorno de relevância como é a utilização da reciclagem de pavimentos flexíveis.

Trichês e Santos (2011) citam que os poucos trabalhos que temos publicado sobre o desempenho em campo das pesquisas tem dificultado o desenvolvimento de projetos de restauração adotando esta alternativa técnica.

Castro (2003) cita resultados de desempenho das rodovias PR-151 (executada em 2002), SP-330 (executada em 2001), BR-277 (executada em 2002) e BR-354 (executada em 2000), que foram executadas com adição de espuma de asfalto. Ela cita ainda um acompanhamento da execução da RJ-106 que foi executada em 2001.

Trichês e Santos (2011) apresentam uma avaliação de desempenho da rodovia SC-303 que foi executada entre 2006 e 2007 no trecho da BR-282 entre Joaçaba e Capinzal. Segundo os autores, esta obra talvez seja a última obra executada que tenhamos os resultados publicados, o que dificulta que mais projetos sejam desenvolvidos com o uso da técnica de reciclagem a frio.

Mas a urgência em se reduzir os impactos ambientais, somados a necessidade de se executar estruturas cada vez mais resistentes aos esforços a que são submetidas pelo tráfego pesado existente, e a rápida liberação de pista são motivos suficientes para que seja adotada esta alternativa de restauração de pavimentos flexíveis.

1.2 Problema da Pesquisa

Grande parte das rodovias no Brasil possuem estruturas antigas e estão em condições de trafegabilidade de risco, principalmente pela falta de manutenção, conservação e reforços estruturais nos pavimentos. Estas rodovias foram implantadas, na sua maioria, há décadas e necessitam urgentemente de restauração.

As atuais estruturas dos nossos pavimentos necessitam de maiores espessuras para atenderem aos esforços a que são solicitados, surgindo-se então a necessidade de remoções mais profundas da estrutura existente para que se executem os reforços na nova estrutura.

Desta forma, os grandes volumes de “bota fora” são inevitáveis, gerando assim um grande consumo de material pétreo, desgastes de máquinas e desperdício de energia, além de gerar custos bem significativos para as obras. Uma alternativa de restauração é a reciclagem de pavimentos flexíveis, pois ela é capaz de dar ao pavimento deteriorado as características estruturais desejadas para uma camada granular. Esta alternativa ainda apresenta uma relevância na questão do aproveitamento do agregado existente, eliminando quase que na totalidade a utilização de pedreiras, cada vez mais escassas.

Trichês e Santos (2011) citam que na obra de reciclagem com adição de cimento da SC-303, executada entre 2006 e 2007, o Departamento de Infraestrutura (DEINFRA/SC) teve uma economia de 2,5% em relação ao projeto original, que previa uma solução convencional para a restauração da rodovia. Não foram computados os benefícios resultantes da minimização dos passivos ambientais que a intervenção propicia pela dificuldade em quantificar monetariamente.

Assim, a reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de estabilizadores como cimento, cal, emulsão asfáltica e espuma de asfalto, aparece como uma boa alternativa para minimizar os custos dos serviços de remoção, transportes de “bota fora” e exploração de pedreiras. Outro aspecto importante é que esta alternativa possibilita um significativo incremento na resistência mecânica na estrutura do pavimento.

Nesse contexto tem-se como questão da pesquisa: Qual é o comportamento do material fresado com adição de cimento Portland e emulsão?

1.3 Justificativas

Rodovias antigas e estruturalmente deficitárias demandam de alternativas que possam recuperar as estruturas, conferindo-lhes melhora das propriedades mecânicas ao pavimento como um todo, e ainda, que minimizem os impactos ambientais. A reciclagem de pavimentos flexíveis se apresenta como uma boa alternativa para estas questões, ao menos é o que pesquisas e reciclagens já executadas no país indicam. A reciclagem de pavimentos reduz significativamente os custos em uma obra, pois a reutilização dos materiais que são fresados evita a exploração de jazidas para se obter grandes volumes de materiais pétreos. Outro fator relevante é que com a adição de estabilizadores a estrutura adquire resistência de suporte, e isso faz com que mantendo a mesma cota de pista a estrutura tenha uma resistência muito maior.

Segundo Taha et al. (1999), a reciclagem de materiais de pavimentação tornou-se uma alternativa viável para ser considerada em manutenção e reabilitação de estradas. Conservação dos recursos, preservação do meio ambiente, e retenção de geometria de rodovias existentes são alguns dos benefícios obtidos através da reutilização de materiais de pavimentação.

A reciclagem do pavimento flexível possibilita a redução na extração de agregados e conseqüentemente a degradação de jazidas ocasionadas pela exploração dos minerais. Outro fator importante é que a reciclagem permite a reutilização dos materiais do pavimento antigo, sendo necessária apenas a correção de granulometria, quando necessária. Esta reutilização evita custos adicionais na obra com transportes, “bota-fora” do material e ainda custos com a exploração de jazidas.

Não existem dados concretos, no Brasil, sobre a real redução de custos com o uso desta técnica, pois ela irá variar conforme a complexidade da obra. Em Santa Catarina o Departamento de Infraestrutura (DEINFRA/SC) registrou uma redução de aproximadamente 2,5% nos custos da obra, porém não conseguiu mensurar a redução dos impactos ambientais para então ter a real redução da obra como um todo. Reduzir os impactos ambientais é necessidade urgente, porém ainda não se tem a forma de se mensurar esta contribuição para o meio ambiente.

Estudos apontam que a adição de estabilizadores tende a aumentar a resistência da estrutura do pavimento. Nos dias de hoje a necessidade de encontrar materiais e misturas que acresçam em resistência se faz necessário, pois as atuais estruturas existentes já não suportam mais os esforços que as rodovias têm sido submetidas.

Outro aspecto importante a ser visto é o tempo de execução e liberação do pavimento submetido à reciclagem. Sabe-se que as reconstruções dos pavimentos consomem tempo para que sejam liberadas e é justamente neste ponto que a reciclagem de pavimentos entra como uma boa alternativa de técnica de restauração de pavimentos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é estudar o comportamento de material fresado com adição de cimento Portland e emulsão.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos serão:

- a) Avaliar as resistências mecânicas obtidas após a adição de agentes estabilizadores nas misturas recicladas;
- b) Identificar os parâmetros de deformabilidade das misturas recicladas;
- c) Realizar o dimensionamento mecanístico de pavimentos considerando o pavimento reciclado e estabilizado como camada granular e comparar com estruturas convencionais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Reciclagem de Pavimentos Flexíveis

Yoder e Witzak (1975) afirmam que o pavimento possui uma vida útil para o qual foi projetado, sendo assim, chega um determinado momento em que uma recuperação do pavimento faz-se necessária. Nesse momento, entre muitas possíveis soluções entra a reciclagem de pavimentos como uma excelente alternativa.

Por reciclagem de pavimentos entende-se a reutilização total ou parcial dos materiais existentes no revestimento e/ou da base e/ou da sub-base, em que os materiais são misturados novamente no estado em que se encontram após a desagregação ou tratados por energia térmica e/ou aditivados com ligantes novos ou rejuvenescedores, com ou sem recomposição granulométrica (MOMM e DOMINGUES, 1995).

A reciclagem de pavimentos flexíveis não é um processo de hoje. Segundo Motta et. al. (2002) há informações de execução de reciclagem com Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) nos Estados Unidos no ano de 1915.

No Brasil, segundo a Bernucci et al. (2008), a reciclagem a frio teve início nos anos 80 (oitenta), quando chegaram as primeiras recicladoras. A primeira obra de reciclagem foi na rodovia Anhanguera que liga São Paulo a Campinas em pista dupla e com extensão total de 90 quilômetros.

David (2006) cita em seu trabalho que entre os anos de 1997 e 2000 foram executados várias obras de reciclagem, entre elas a RS-040 (Viamão a Pinhal) que utilizou adição de espuma de asfalto e cimento, a SP-160 (Rodovia dos Imigrantes) que utilizou cal, a BR-381 (Rodovia Fernão Dias) que utilizou emulsão rejuvenescedora.

Hoje se tem modernos equipamentos que fresam e reciclam simultaneamente, porém o princípio é o mesmo utilizado no início do século XIX, que são as ações de fragmentar, triturar, remover, tratar o material degradado e executar a nova camada com o aproveitamento do material ora fresado.

Aproveitando-se o material que seria removido e espalhado em algum “bota-fora” da obra busca-se evitar a exploração de jazidas já escassas, evitando assim a agressão direta ao meio ambiente. Importante considerar ainda que a reciclagem poderá possibilitar além do revigoramento do material, melhorias significativas no estrutural da camada, dependendo do material aglutinante a ser empregado.

A reciclagem pode ser uma ótima alternativa, porém um estudo de viabilidade para cada caso deve ser feita, a fim de se ter de forma clara se o investimento trará o retorno desejado e se é, do ponto de vista econômico, exequível.

Segundo o DNIT (2006), a reciclagem de pavimentos pode oferecer benefícios como:

- a) Conservação de agregados, de ligantes e de energia;
- b) Preservação do meio ambiente;
- c) Restauração das condições geométricas existentes.

Segundo a *Asphalt Recycling and Reclaiming Association - ARRA* (2001), a reciclagem dos materiais de pavimentação garante um meio adicional de manutenção dos pavimentos para as rodovias envelhecidas. Os benefícios desta técnica incluem:

- a) Reutilização e conservação de recursos naturais não renováveis;
- b) Preservação do meio ambiente e redução do volume de bota-fora;
- c) Conservação de energia;
- d) Redução do congestionamento de tráfego durante a obra;
- e) Períodos mais curtos de atividades na obra;
- f) Segurança de tráfego aumentada na área de abrangência das obras;
- g) Preservação da geometria original da via e dos gabaritos verticais;
- h) Possibilidade de fazer correções do perfil longitudinal e do abaulamento do pavimento;
- i) Ausência de revolvimento do subleito original, a menos que assim seja especificado, como nos casos eventuais de processos de reciclagem profunda (RP);
- j) Suavização da irregularidade longitudinal;
- k) Melhora das propriedades físicas do pavimento pela correção granulométrica dos agregados existentes e pela adição de ligantes;
- l) Possibilidade de eliminação ou minimização da reflexão de trincas com utilização de alguns métodos específicos;
- m) Desempenho superior da rodovia;
- n) Economia de custos em relação aos métodos tradicionais de restauração.

2.2 Tipos de Reciclagem

Os diferentes tipos de reciclagem se diferenciam quanto ao local onde é produzida a mistura e a temperatura que se vai produzir, pois a temperatura está diretamente ligada as características dos materiais a reciclar e pelo ligante utilizado.

Importante lembrar que dentro de cada tipo de reciclagem ainda existem suas peculiaridades de execução, sendo o roteiro executivo um importante fator a ser considerado no momento da avaliação do comportamento da estrutura como um todo.

Segundo Fonseca (2002), com os atuais equipamentos disponíveis as técnicas de reciclagem *in situ* apresentam grandes vantagens como menores custos no processo todo, menores consumos energéticos nas produções de agregados, das misturas e da execução em pista, além de menores degradações das estradas por não necessitar transportar de uma central para o local da execução.

O Quadro 1 apresenta os tipos de reciclagem que são geralmente empregadas.

Quadro 1: Tipos de Reciclagem.

Local onde se produz a mistura	a) <i>In situ</i> - na estrada
	b) Central - com incorporação até 50% em novas misturas betuminosas
Temperatura da mistura	a) A frio: <i>in situ</i>
	b) A quente: <i>in situ</i> ou em central
Características do material a reciclar	a) Camada homogênea
	b) Duas ou mais camadas com diferentes tipos de materiais
Tipo de ligante	a) Cimento
	b) Cal e Cimento
	c) Emulsão betuminosa
	d) Espuma de betume
	e) Cimento com emulsão

Fonte: Fonseca (2002).

A reciclagem *in situ*, que será a ênfase desta pesquisa, é composta por três operações básicas, a fresagem do material que será recuperado, a mistura a frio do material desagregado com água, ligantes e agregados para eventual correção granulométrica e ainda a compactação da mistura que dará origem a nova camada do pavimento.

Segundo DNIT (2006), a reciclagem a frio não é uma técnica recente, pois vários órgãos rodoviários já executam este tipo de restauração há alguns anos. O roteiro de execução tem sido romper o pavimento degradado, pulverizar, adicionar e misturar os estabilizadores, e, por fim, compactar o material.

BONFIM (2001) apresenta uma classificação mais abrangente para as reciclagens, como pode-se ver no Quadro 2.

Quadro 2: Tipos de Reciclagem.

Quanto à geometria original	Sem modificação	Quando se mantêm as cotas do greide
	Com modificação	
Quanto ao local de processamento	Em usina	Fixa ou móvel, a quente ou a frio
	"In situ"	
	Mista	"in situ" da reciclagem base e aplicação de reciclagem a quente, processada em usina com material fresado
Quanto à fresagem do material	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Realizada com pré-aquecimento do pavimento
Quanto à profundidade do corte	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e até sub-base
Quanto à mistura reciclada	Mistura a frio	PMF
	Mistura a quente	CBUQ, PMQ
Quanto ao uso da mistura	Como base reciclada	
	Como camada de ligação	
	Como revestimento	
Quanto aos materiais adicionados	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland e Cal	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão especial, CAP, Polímeros	Rejuvenescimento
	Mistura asfáltica	Adição de material fresado

Fonte: Bonfim (2001).

A ARRA (2001) apresenta várias subcategorias para definir mais especificamente a reciclagem de pavimentos asfálticos sendo:

- a) Reciclagem a Quente *In situ* – RQI
 - a. Reciclagem Superficial de Capa – RSC (Surface Recycling);
 - b. Reciclagem Intermediária de Capa – RIC (Remixing);
 - c. Reciclagem e Recapeamento Simultâneos – RRS (Repaving).
- b) Reciclagem a Frio – RF
 - a. Reciclagem a Frio *In situ* – RFI;
 - b. Reciclagem a Frio em Usina Fixa – RFUF.
- c) Reciclagem Profunda – RP
 - a. Trituração;

- b. Estabilização Mecânica;
- c. Estabilização Betuminosa;
- d. Estabilização Química.

2.2.1 Reciclagem a Quente

DNIT (2006) define que a reciclagem a quente pelas seguintes Normas:

- a) DNIT 033/2005-ES – Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação de Serviço;
- b) DNIT 034/2005-ES – Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de Serviço.

As Normas apresentam todo o processo em que parte ou toda a estrutura do pavimento é reduzida a dimensões apropriadas para depois ser misturado a quente no local (*in situ*) ou em usina estacionária.

David (2006) cita que no caso da reciclagem a quente em usina fixa tem-se duas opções, que é a utilização de usinas gravimétricas ou as volumétricas também conhecidas por “Drum Mixer”. Ambas as usinas são utilizadas em pavimentação e restauração de rodovias.

2.2.1.1 Reciclagem a Quente em Usina

A reciclagem a quente em usinas estacionárias é um processo no qual uma parte ou toda a estrutura do revestimento é removida e reduzida, geralmente através de fresagem à frio, e posteriormente transportada para ser misturada e recuperada em usina de asfalto. (DNIT, 2006).

Segundo ARRA (2001), uma vez produzida a mistura reciclada na usina estacionária, esta mistura é transportada, lançada e compactada com equipamentos convencionais para massas asfálticas. A temperatura de usinagem é mais baixa que as exigidas para a produção de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) convencional. Esta redução de temperatura é para reduzir os efeitos de temperaturas altas nas usinas e conseqüentemente reduz o gradiente entre as temperaturas de usinagem e de compactação.

A ARRA (2001) cita que a reciclagem a quente é um processo que combina o Pavimento Asfáltico Recuperado – RAP com agregados novos ou virgens, novos ligantes asfálticos e/ou novos agentes rejuvenescedores (conforme a necessidade) em uma usina fixa para produção de uma mistura reciclada.

A reciclagem a quente amolece o RAP pelo método de transferência de calor, facilitando assim, a mistura dos agregados virgens e ligantes asfálticos e/ou agentes rejuvenescedores.

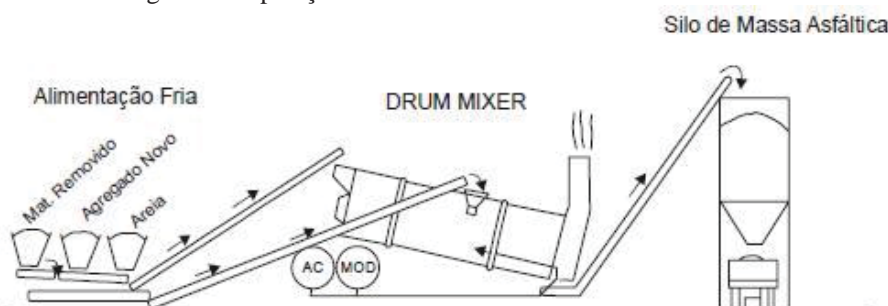
Na Figura 1 é mostrada, de forma simplificada, a operação de uma usina de asfalto gravimétrica, enquanto que na Figura 2 é apresentada, também na forma simplificada, a operação de uma usina de asfalto volumétrica.

Figura 1 – Operação de uma usina de asfalto gravimétrica.



Fonte: DNIT (2006).

Figura 2 – Operação de uma usina de asfalto volumétrica.



Fonte: DNIT (2006).

2.2.1.2 Reciclagem a Quente *in situ*

A reciclagem a quente no local ou "*in situ*" é definida como um processo de correção de defeitos de superfície, através do corte e fragmentação do revestimento asfáltico antigo, mistura com agente rejuvenescedor, agregado virgem, material ou mistura asfáltica, e posterior distribuição da mistura reciclada sobre o pavimento, sem remover do local original o material a ser reciclado (DNIT, 2006).

Segundo ARRA (2001), com a reciclagem a quente *in situ* - RQI, todo o processo de reciclagem do pavimento existente é realizado no campo. Com espessuras entre 20 mm e 75 mm o processo consiste em aquecer e amolecer o revestimento asfáltico existente, permitindo que ele seja escarificado ou fresado com um tambor rotativo, até atingir a espessura determinada.

De acordo com ARRA (2001), dentro da RQI se apresentam as subcategorias: reciclagem superficial da capa (RSC), a reciclagem intermediária da capa (RIC) e a reciclagem e recapeamento simultâneos (RRS). Conforme o processo adotado é a reciclagem executada.

ARRA (2001) cita que a RQI utiliza vários equipamentos que por sua vez ficam enfileirados e por isso são chamados de “patrulhas” ou “trens”. A Figura 3 mostra o sequencial de equipamentos.

Figura 3 – Reciclagem a quente *in situ* nos EUA.



Fonte: ARRA (2001).

2.2.2 Reciclagem a Frio

Segundo DNIT (2006), a reciclagem a frio é um processo no qual toda a estrutura do pavimento, ou parte dela, é removida e reduzida a dimensões apropriadas para depois ser misturadas a frio no próprio local ou em usina. Poderão ser adicionados materiais betuminosos (emulsão asfáltica), agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos. A mistura final poderá ser utilizada em camada de base, que deverá receber um revestimento antes de ser submetida a ação do tráfego.

Momm e Domingues (1995) afirmam que a reciclagem a frio é quando o reprocessamento dos materiais de pavimentação ocorre sem o dispêndio de energia para o aquecimento dos mesmos.

2.2.2.1 Reciclagem a Frio em Usina

David (2006) cita que a reciclagem a frio em usina é utilizada quando existe material removido do pavimento estocado, quando por alguma razão o material fresado precisa ser removido da pista ou quando não se pode reciclar *in situ*.

Segundo David (2006), 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 novas misturas a frio que sejam utilizadas como base.

Segundo DNER (1996), o emprego de usinas de solos é grande em países europeus e a porcentagem de reaproveitamento do material fresado pode atingir os 90%.

A Figura 4 mostra uma usina para reciclagem a frio.

Figura 4 – Reciclagem a Frio em Usina.



Fonte: Wirtgen (2004).

2.2.2.2 Reciclagem a Frio *in situ*

Segundo Brown Brown (2012), a reciclagem a frio *in situ* pode resolver, com excelente custo benefício, um grande número de problemas. O processo permite a remoção de trincas de

fadiga do revestimento envelhecido, evita a reflexão de trincas, recupera a seção transversal da pista, conserva os padrões dos dispositivos de drenagem e melhora ou corrige a granulometria da mistura. A Figura 5 apresenta o “comboio” da reciclagem a frio.

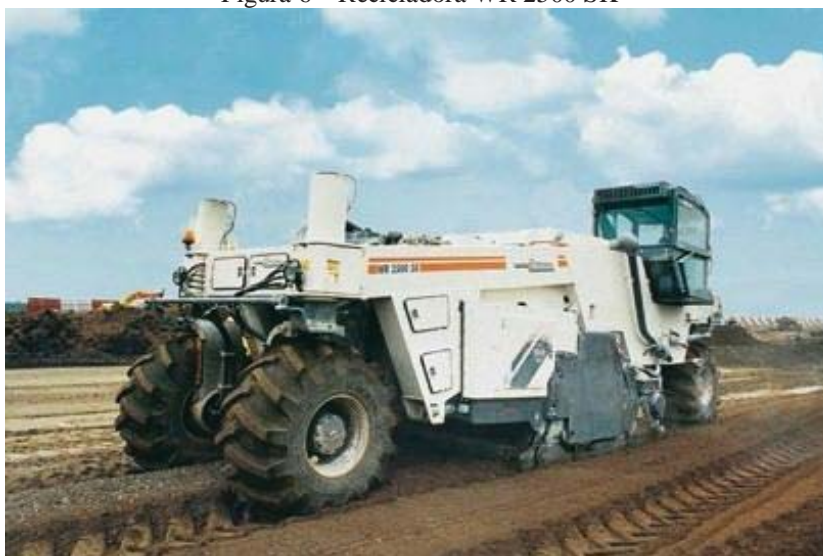
De acordo com Castro (2003), a reciclagem a frio *in situ* é executada com a utilização de equipamento do tipo fresadora-recicladora, sendo a WR 2500 a mais utilizada no Brasil. A Figura 6 apresenta a recicladora da Wirtgen.

Figura 5 – Reciclagem a Frio *in situ*.



Fonte: Brown Brown (2012).

Figura 6 – Recicladora WR 2500 SK

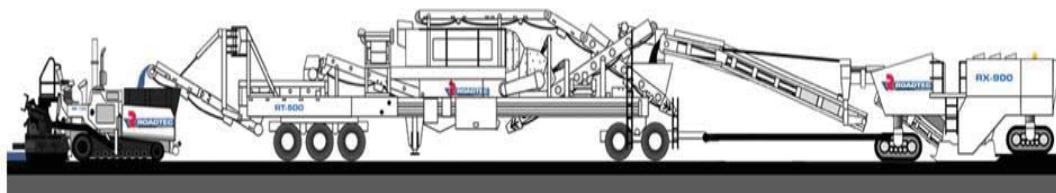


Fonte: Wirtgen (2012).

O processo construtivo da reciclagem a frio *in situ* é feito através de um circuito fechado que se inicia com a fresagem na espessura determinada em projeto, passando pelo processo homogeneização dos agregados e aditivos (se houver), espalhamento e compactação

Brown Brown (2012) cita que a compactação é iniciada imediatamente após o espalhamento da mistura reciclada. A empresa adota para controle de compactação e a definição padrão de rolagem um medidor de rigidez portátil, o Humboldt (Hombolt Stifness Gauge – Geoguage). Este equipamento aplica uma carga vibratória constante na superfície do solo e mede a rigidez, o módulo e a flexão daí resultante *in loco*. Na Figura 7 podemos visualizar o esquema sequencial da reciclagem a frio *in situ*.

Figura 7 – Reciclagem a Frio *in situ* – Esquema de Equipamentos.



Fonte: Brown Brown (2012).

2.2.3 Reciclagem Profunda

Segundo ARRA (2001), a reciclagem profunda (RP) é a técnica de restauração de rodovias na qual a espessura completa da capa asfáltica mais uma espessura pré-determinada do material subjacente (base, sub-base e/ou subleito) é uniformemente pulverizada e misturada, produzindo um material homogêneo e de melhor qualidade. Esquemáticamente o processo de reciclagem profunda é apresentado na Figura 8.



Fonte: Revisa-sa (2012).

ARRA (2001) cita ainda que se o material triturado, resultante da reciclagem, precisar de melhorias físicas ou modificações pertinentes, três são os tipos de estabilizações que podem ser usadas, sendo elas:

- a) Mecânica;
- b) Química;
- c) Betuminosa.

Conforme ARRA (2001), a estabilização mecânica é adquirida com a adição de materiais granulares, enquanto que a estabilização química é adquirida com a adição de cal, cimento Portland, cinza volante, cloreto de cálcio ou magnésio entre outros produtos químicos. Para a estabilização betuminosa a adição é de asfalto diluído, emulsão asfáltica e/ou espuma de asfalto. Existe ainda a possibilidade de se usar uma combinação de adição das três formas de estabilização possíveis.

2.3 Aspectos Técnicos

DNIT (2006), no manual de restauração de pavimentos asfálticos, apresenta diversos fatores que possam levar pela escolha da reciclagem entre as várias alternativas de restauração de um pavimento, entre eles:

- a) Observação dos defeitos do pavimento;
- b) Determinação das causas prováveis dos defeitos, baseado em estudos de laboratório e de campo;
- c) Informações de projeto e histórico das intervenções de conservação;
- d) Custos;
- e) Histórico do desempenho do pavimento;
- f) Restrições quanto a geometria da rodovia (horizontal e vertical);
- g) Fatores ambientais;
- h) Tráfego.

DNIT (2006) frisa a importância de se definir o que se deseja com o pavimento reciclado, se um reforço estrutural ou um pavimento com maior conforto no rolamento entre outros.

Segundo DNIT (2006), na seleção do processo deverão ser considerados os itens:

- a) Condição de superfície (trincamentos, desgastes, afundamentos nas trilhas de roda, etc);
- b) Capacidade estrutural;

- c) Qualidade do material;
- d) Disponibilidade de material virgem;
- e) Irregularidade longitudinal;
- f) Resistência à derrapagem (se o material for usado para camada de revestimento);
- g) Localização e extensão do trecho;
- h) Classe da rodovia;
- i) Seção transversal do pavimento;
- j) Condições geométricas;
- k) Tráfego (atual e futuro);
- l) Condições de remanejamento do tráfego;
- m) Disponibilidade de equipamento;
- n) Características do subleito e da base;
- o) Objetivo da restauração.

A FHWA (1997) elaborou uma orientação para a escolha do tipo de reciclagem a partir de indicadores de desempenho como mostra o Quadro 3.

Quadro 3: Guia para a seleção de Métodos para Reciclagem.

Condição do Pavimento		Reciclagem a quente em usina	Reciclagem a quente "in situ"	Reciclagem a frio "in situ"
Defeitos de superfície				
	Desagregação	X	X	
	Exsudação	X	X	
	Empolamento	X	X	
Deformação				
	Corrugações	X	X	
	Afundamento de trilha de roda	X	X	
	Depressões	X		X
Trincamento (associado à carga)				
	Couro de jacaré	X		X
	Longitudinal (na trilha de roda)	X	X	X
	Trinca de borda	X		X
	Trincamento parabólico	X	X	
Trincamento (não associado à carga)				
	Blocos (retração)	X		X
	Longitudinal (juntas)	X	X	
	Transversal (térmica)	X		X
Reflexão de trincas		X		X
Remendos de manutenção		X		X
Qualidade de rolamento				
	Desnível generalizado	X	X	
	Adensamentos	X	X	
	Afundamentos localizados	X	X	

Fonte: FHWA (1997).

Rogge et. al. (1993) apresentou alguns critérios para a escolha dos pavimentos a serem reciclados a frio. O Quadro 4 mostra os critérios adotados.

Quadro 4: Critérios para adotar ou não a Reciclagem a Frio.

CRITÉRIOS PARA A RECICLAGEM A FRIO "in situ"
A RECICLAGEM A FRIO "in situ" NÃO É RECOMENDADA:
Pavimentos que apresentem problema no subleito.
Incompatibilidade ao volume de tráfego.
Desagregação precoce do revestimento.
Pavimentos exibindo afundamentos de trilhas de roda devido a instabilidade da mistura, excesso de ligante.
Frio e umidade elevada, incluindo áreas sujeitas a alagamentos.
Revestimento asfáltico com espessura inferior a 4cm.
A RECICLAGEM A FRIO "in situ" É RECOMENDADA:
Pavimentos trincados devido a idade do revestimento.
Pavimentos com diversos recapeamentos sucessivos.
Pavimento com problemas de drenagem entre as camadas originais e de reforço.
Desintegração do revestimento devido a idade.
Como "binder" e base no caso de recapeamento.
VMD inferior a 5000 veículos.
Reabilitação seletiva.
Insuficiência de agregados virgens na região.

Fonte: Rogge et. al. (1993).

2.4 Vantagens e Desvantagens da Reciclagem de Pavimentos

2.4.1 Reciclagem a quente

DNIT (2006) afirma que do ponto de vista exclusivamente da eficiência em custos, a reciclagem a quente do pavimento existente deve ter maior aplicação no planejamento da restauração de pavimentos.

DNIT (2006) aponta que a conservação de energia desta técnica quando comparada com outros métodos de restauração apresenta uma economia bastante significativa. O Quadro 5 mostra a comparação entre os consumos de energia.

Quadro 5: Comparação entre Consumo de Energia.

PROCESSO	NECESSIDADE DE ENERGIA (BTU/ton)
Recape com mistura nova (e=4cm)	581.980
Fresagem a frio e reciclagem a quente em usina	
20% reciclado / 80% mistura nova (e=4cm)	542.049
40% reciclado / 60% mistura nova (e=4cm)	488.401
Reciclagem a quente na pista (e=4cm)	202.300

Fonte: DNIT (2006).

Santos (2010) cita que o custo elevado dos equipamentos associados ao processo de reciclagem a quente é uma das desvantagens da técnica. Cita ainda que a técnica a quente acarreta também um elevado consumo de energia além da poluição produzida.

2.4.2 Reciclagem a frio

De acordo com DNIT (2006) são diversas vantagens observadas a partir do uso das técnicas de reciclagem a frio, a saber:

- a) Quando uma camada de concreto asfáltico existente é pulverizada e misturada juntamente com o agregado da base existente, o asfalto residual atua como um excelente ligante para auxiliar na confecção de uma base reciclada menos suscetível à ação da água;
- b) A adição de um novo ligante ou de um estabilizante químico, tais como cal ou cimento, poderá contribuir para evitar a expansão da base reciclada, aumentar a impermeabilização da base e aumentar a capacidade de carga da estrutura do pavimento;
- c) Aumentando a capacidade de carga da camada de base, a estrutura do pavimento poderá ser mais delgada, o que significará menor quantidade de material necessária e, portanto, economia de materiais virgens selecionados;
- d) O material considerado como rejeito, devido ao grau de exigência da nova camada de revestimento, poderá ser estocado para uso futuro.

David (2006) cita que uma das vantagens é o aproveitamento total dos agregados pétreos existentes no pavimento, reduzindo a exploração de pedreiras e conferindo um componente ecológico muito importante a esta técnica.

Momm e Domingues (1995) citam que a obtenção de uma camada reprocessada com características mecânicas mais homogêneas é mais vantajosa do que um conjunto de recapeamentos sucessivos fraturados.

DNIT (2006) apresenta ainda algumas desvantagens no uso das técnicas de reciclagem a frio quando comparadas com outras técnicas de restauração, a saber:

- a) O equipamento de pulverização necessita frequentemente de reparos e, portanto a produção pode ser baixa;
- b) A interrupção do tráfego pode ser maior do que em outras atividades de restauração;
- c) O período de cura normalmente é necessário para se obter a resistência desejada;
- d) Durante a execução e o período de cura existe muita susceptibilidade às condições climáticas, como temperatura e umidade;
- e) O controle de qualidade das operações na pista não é tão bom quanto nas operações com usina central.

2.5 Agentes de Reciclagem

Para 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. Eles apontam os principais agentes que podem ser usados sozinhos ou conjuntamente, que são:

- a) Emulsão Asfáltica – Pode ser emulsão convencional ou desenvolvida especificamente para cada mistura reciclada;
- b) Agente de Reciclagem Emulsionado (ARE) – Tem a função de recompor o balanceamento dos componentes maltenos e asfaltenos do pavimento envelhecido;
- c) Cal – Tem função de melhorar a capacidade de suporte, aumentar a rigidez ou influenciar na ruptura da emulsão;
- d) Água – Tem a função de umedecer a mistura para atingir a umidade ótima e /ou diluir a emulsão ou outros aditivos.

Merighi e Fortes (2005) citam como agente estabilizador o cimento. O cimento é um agente que estabiliza e agrega resistência. Eles citam ainda que, em termos filosóficos, a base reciclada com adição de cimento Portland pode ser comparada a uma base cimentada.

David (2006) cita que existem outros agentes que podem ser adicionados nas misturas recicladas a frio como a espuma de asfalto e as emulsões rejuvenescedoras modificadas por polímeros.

2.5.1 Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP

O CAP utilizado para produzir a espuma de asfalto é oriundo da indústria petroquímica e atende as normas vigentes para ligante asfáltico. As especificações dos ligantes são apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6: Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo – Classificação por Penetração.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30-45	50-70	85-100	150-200	NBR 6576	D 5	ME 003/99
	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol	s					NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135°C, min		192	141	110	80			
a 150°C, min		90	50	43	36			
a 177°C		40-150	30-150	15-60	15-60			
OU								
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20rpm, min		374	274	214	155			
a 150°C, SP 21, min		203	112	97	81			
a 177°C, SP 21		76-285	57-285	28-114	28-114			
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor. Min	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25°C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C,85min						D 2872		
Varição em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25°C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: DNIT-EM 095 (2006).

2.5.2 Cal

A cal utilizada nas misturas recicladas é a Cal Hidratada do tipo CH-II, comercialmente encontrada como Primor Extra, Frical, Finacal entre outras. A ABPC (Associação Brasileira dos Produtores de Cal) faz a verificação de qualidade dos produtos colocados no mercado através do Programa Setorial da Qualidade de Cal Hidratada para a Construção Civil desde 1995, tendo como orientação o que prescreve a NBR 7175/2003. As especificações químicas e físicas estão apresentadas na sequência pelo Quadro 7 e Quadro 8.

Quadro 7: Especificações Químicas da Cal.

COMPOSTOS		LIMITES		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	=< 5%	=< 5%	=< 13%
	No depósito	=< 7%	=< 7%	=< 15%
Óxido não hidratado calculado		=< 10%	=< 15%	=< 15%
Óxidos totais na base de não voláteis (CaO + MgO)		=> 90%	=> 88%	=> 88%

Fonte: NBR 7175 (2003).

Quadro 8: Especificações Físicas da Cal.

DETERMINAÇÕES		LIMITES		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600mm (nº30)	=< 5%	=< 5%	=< 5%
	Peneira 0,075mm (nº200)	=< 10%	=< 15%	=< 15%
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Retenção de água		=> 75%	=> 75%	=> 70%
Plasticidade		=> 110	=> 110	=> 110
Incorporação de areia		=> 3,0	=> 2,5	=> 2,2

Fonte: NBR 7175 (2003).

2.5.3 Cimento Portland

O Cimento Portland utilizado na reciclagem de pavimentos flexíveis pode ser adotado conforme a disponibilidade da região. Neste estudo foi utilizado o CP-IV 32 que tem adição de pozolana e junto ao CP-III são considerados os mais ecológicos por terem menor adição de

clínquer e assim menor emissão de CO₂ para sua produção. A norma que orienta para a verificação é a NBR 5736/91. O ideal seria utilizar o cimento CP-III por ser o mais ecológico dos tipos de cimento produzido no Brasil tendo o menor teor de CO₂ liberado na atmosfera, podendo ter o aproveitamento de rejeitos das siderurgias e de ter em suas características a resistência aos sulfatos. Na Figura 9 é mostrado as características dos diferentes tipos de cimento, em especial o CP IV que é o utilizado nesta pesquisa.

Figura 9 – Composição dos cimentos Portland.

CIMENTO PORTLAND (ABNT)	TIPO	CLÍNQUER + GESSO (%)	ESCÓRIA SIDERÚRGICA (%)	MATERIAL POZOLÂNICO (%)	CALCÁRIO (%)
CP I	Comum	100	-	-	-
CP I – S	Comum	95-99	1-5	1-5	1-5
CP II – E	Composto	56-94	6-34	-	0-10
CP II – Z	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CP II – F	Composto	90-94	-	-	6-10
CP III	Alto-forno	25-65	35-70	-	0-5
CP IV	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CP V – ARI	Alta resistência inicial	95-100	-	-	0-5

Fonte: Votorantim Cimentos (2014).

2.5.4 Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada na reciclagem pode ser do tipo ruptura média (RM) ou ruptura lenta (RL) ou ainda uma emulsão específica para a reciclagem. A escolha do tipo normalmente tem referência à quantidade de pó no agregado da mistura. Usualmente adota-se o RL se a quantidade de pó no agregado for maior, pois precisa de mais tempo para que a emulsão envolva por completo os agregados envolvidos na mistura reciclada. Hoje já se tem as emulsões que são produzidas especialmente para cada mistura reciclada, levando em consideração as características do agregado.

Neste estudo foi utilizada a emulsão específica para a reciclagem de pavimentos, a Estabisolo, emulsão está que foi produzida pela empresa Betunel a fim de atender as características da mistura reciclada obtida. A emulsão preparada é similar às características do tipo de ruptura lenta, tendo um percentual de 50,5% de resíduo na mistura, ou seja, a emulsão

pura contém 49,5% de água. No Quadro 9 são apresentadas as especificações para as emulsões asfálticas segundo o DNIT.

Quadro 9: Especificações de Emulsões Catiônicas.

CARACTERÍSTICAS	MÉTODOS DE ENSAIOS	TIPOS				
		RUPTURA RÁPIDA		RUPTURA MÉDIA		RUPTURA LENTA
		RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C	RL-1C
Ensaio sobre a emulsão:						
a) Viscosidade Saybolt Furol: SSF a 50°C	ABNT MB-581	20-90	100-400	20-200	100-400	máx. 70
b) Sedimentação, 5 dias, % em peso máximo por diferença	DNER-ME 006	5	5	5	5	5
c) Peneiramento (retido na peneira 0,84mm) % máximo, em peso	DNER-ME 005	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
d) Resistência à água, % mínimo de cobertura:	DNER-ME 059					
agregado seco		80	80	80	80	80
agregado úmido		80	80	60	60	60
e) Mistura com cimento, % máximo	DNER-ME 007	-	-	-	-	2
ou mistura com filer silícico	DNER-ME 008	-	-	-	-	1,2 - 2,0
f) Carga da partícula	DNER-ME 002	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva
g) pH, máximo	DNER-ME 149	-	-	-	-	6,5
h) Destilação:	NBR 6568					
solvente destilado, % em volume sobre o total da emulsão		0-3	0-3	0-20	0-12	-
resíduo, % mínimo, em peso:		62	67	62	65	60
i) Desmulsibilidade, % peso:	DNER-ME 063					
mínimo		50	50	-	-	-
máximo		-	-	50	50	-
Ensaio sobre o resíduo:						
a) Penetração a 25°C, 100g, 5s, 01mm	DNER-ME 003	50-250	50-250	50-250	50-250	50-250
b) Teor de betume, % mínimo em peso	DNER-ME 010	97	97	97	97	97
c) Ductibilidade a 25°C, 5cm/mín, cm, mínimo	DNER-ME 163	40	40	40	40	40

Fonte: DNIT-EM 369 (1997).

2.6 Experiências na Reciclagem de Pavimentos Flexíveis

Segue alguns pavimentos flexíveis reciclados no Brasil. As experiências em que se tem os resultados de desempenho divulgados são poucos, deixando-se de difundir umas das técnicas de restauração mais promissoras para a pavimentação brasileira.

2.6.1 Rodovia BR-290/RS (Pista Sul)

Em julho de 2001 foi executada a reciclagem com espuma de asfalto na BR-290/RS entre os km 97,4 e km 112,6 na pista sentido Porto Alegre e também chamada de Pista Sul. O Quadro 10 apresenta as características executivas do projeto de restauração.

Quadro 10: Características Executivas da Rodovia.

RODOVIA	TRECHO	BR-290/RS
Espessura da camada reciclada, cm	km 97,4 ao 109,0	16
	km 109,0 ao 112,6	17
Revestimento colocado sobre a base reciclada	km 97,4 ao 112,6	CBUQ com espessura de 5cm
CAP utilizado para espumar		CAP 20
Teor de espuma de asfalto, %	km 97,4 ao 109,0	2,8
	km 109,0 ao 112,6	2,7
Teor de calcareo dolomítico, %	km 97,4 ao 109,0	3
	km 109,0 ao 112,6	4
Data de execução dos serviços		julho de 2001

Fonte: Dama (2003).

Dama (2003) analisou o comportamento da mistura reciclada durante a execução e com acompanhamento de seis meses e um ano após a execução. No Quadro 11 podemos visualizar os resultados obtidos para o módulo de resiliência destas misturas.

Quadro 11: Resultados Obtidos.

Trecho	Módulo de Resiliência (MPa)	
	dez/01	jun/02
km 97+400 ao km 102+320	893	981
km 104+160 ao km 106+480	623	996
km 107+320 ao km 112+000	501	691

Fonte: Dama (2003).

Dama (2003) observou ainda que o comportamento elástico ficou intermediário tendo seu módulo acima de uma brita convencional e sua a resistência à tração, que oscilou entre 0,4 a 0,8 MPa, equivalente a uma mistura asfáltica. Concluiu ainda que a reciclagem com espuma de asfalto é uma boa alternativa de recuperação de pavimento, desde que a recuperação seja devidamente projetada e bem executada.

2.6.2 Rodovia PR-151 (Ponta Grossa a Jaguariaiva)

Segundo Castro (2003), nesta rodovia observou-se como fator relevante que a adição de espuma de asfalto obteve MR muito superior em relação às amostras sem adição.

O Quadro 12 apresenta as características executivas da rodovia, enquanto que o Quadro 13 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 12: Características Executivas da Rodovia.

RODOVIA	PR-151
Espessura da camada reciclada, cm	15
Tipo de revestimento existente na pista a reciclar	CBUQ com espessura de 5cm
Característica da base	Brita graduada com espessura variável
Revestimento colocado sobre a base reciclada	CBUQ com espessura de 5cm e micro revestimento à frio com 10mm de espessura
Local de moldagem dos corpos-de-prova	Moldados na pista
CAP utilizado para espumar	CAP 85/100
Teor de espuma de asfalto, %	2
Tipo e teor de cimento, %	CP III, 1
Teor de pó de pedra, %	20
Data de execução dos serviços	18/04/2002

Fonte: Castro (2003).

Quadro 13: Resultados dos Ensaios.

Nº do CP		ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	D_{ap}	D_{ef}	MR (MPa)	σ_r seco (MPa)	σ_r saturado (MPa)	RELAÇÃO DAS RESIST. (%)
Lab.	Projeto								
4820	1	6,75	10,17	2,30	2,14	2,548	0,55	-	-
4821	2	6,79	10,16	2,31	2,11	2,335	-	0,35	61
4822	3	6,95	10,19	2,43	2,12	473	0,14	-	-
4823	4	7,21	10,18	2,43	2,13	558	-	0,089	64

Fonte: Castro (2003).

2.6.3 Rodovia SP-330 (Anhanguera)

Segundo Castro (2003), nesta rodovia observou-se que a adição de cal e cimento não agregou muito na RT. No entanto, quando há incremento de 0,5% de teor de espuma de asfalto, até o limite de 3,5%, há um ganho de RT. Observou-se também que a adição de cal obteve um MR maior do que as amostras com adição de cimento.

O Quadro 14 e o Quadro 15 apresentam as características executivas da rodovia, enquanto que no Quadro 16 são apresentados os resultados obtidos nesta obra.

Quadro 14: Características Executivas da Rodovia.

RODOVIA	SP-330 (Anhanguera)
Espessura da camada reciclada, cm	17
Tipo de revestimento existente na pista a reciclar	CBUQ com espessura de 10cm
Característica da base	Brita graduada com espessura de 20cm
Revestimento colocado sobre a base reciclada	CBUQ com espessura de 6cm e micro revestimento à frio com 10mm.
Local de moldagem dos corpos-de-prova	Moldados na pista
CAP utilizado para espumar	CAP 20
Teor de espuma de asfalto, %	Ver quadro 13
Tipo e teor de cimento, %	Ver quadro 13
Data de execução dos serviços	28/08/2001

Fonte: Castro (2003).

Quadro 15: Características Executivas - Complementar.

Nº do CP	Teor de Espuma de Asfalto, %	Tipo e Teor de Cimento, %	Teor de Cal, %
4596	2,5	-	3,0
4597	2,5	-	3,0
4598	3,0	-	3,0
4599	3,5	-	3,0
4600	4,0	-	3,0
4601	2,8	CP III, 1,5	-
4602	2,8	CP III, 1,5	-
4603	2,8	CP III, 1,5	-
4604	2,8	CP III, 1,0	-

Fonte: Castro (2003).

Quadro 16: Resultados dos Ensaio.

Nº do CP		ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	D _{ap}	D _{ef}	MR (MPa)	σ seco (MPa)
Lab.	Projeto						
4596	26	5,99	10,20	2,43	2,31	3551	0,54
4597	27	5,89	10,16	2,40	2,32	3971	0,40
4598	28	6,01	10,19	2,37	2,3	4203	0,49
4599	29	6,05	10,17	2,36	2,27	2773	0,50
4600	30	6,01	10,31	2,30	2,23	3609	0,42
4601	31	5,51	10,09	2,46	2,37	1413	0,00
4602	32	6,44	10,14	2,36	2,33	3751	0,50
4603	33	6,19	10,13	2,35	2,31	4688	0,00
4604	34	4,88	10,16	2,39	2,35	2628	0,39

Fonte: Castro (2003).

2.6.4 Rodovia BR-277 (São Luis do Purunã a Campo Largo)

Segundo Castro (2003), nesta rodovia observou-se que a RT ficou dentro do mínimo especificado que é de 0,40 MPa. O MR ficou com valor baixo quando o teor de espuma de asfalto foi de 1,5%. Quando o teor passou para 3% houve um incremento significativo na RT.

O Quadro 17 apresenta as características executivas da rodovia, enquanto que o Quadro 18 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 17: Resultados dos Ensaio.

RODOVIA	BR-277 (São Luís do Purunã a Campo Largo)
Espessura da camada reciclada, cm	15
Tipo de revestimento existente na pista a reciclar	CBUQ com espessura de 10cm
Característica da base	Brita graduada com espessura de 20cm
Revestimento colocado sobre a base reciclada	CBUQ com espessura de 6cm
Local de moldagem dos corpos-de-prova	Moldados na pista
CAP utilizado para espumar	CAP 100/120
Teor de espuma de asfalto, %	1,5
Tipo e teor de cimento, %	CP III, 1
Data de execução dos serviços	23/03/2002

Fonte: Castro (2003).

Quadro 18: Resultados dos Ensaio.

Nº do CP		ALTURA MÉDIA (cm)	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	D _{ap}	D _{ef}	MR (MPa)	σ seco (MPa)	σ saturado (MPa)	RELAÇÃO DAS RESIST. (%)
Lab.	Projeto								
4726	1	6,71	10,16	2,35	2,27	2850	0,63	-	-
4727	2	6,58	10,11	2,38	2,27	1893	0,67	-	-
4728	3	6,35	10,14	2,38	2,27	2810	0,63	-	-
4729	4	6,81	10,12	2,37	2,25	2217	-	0,31	48
4730	5	6,85	10,16	2,42	2,26	2098	-	0,35	52

Fonte: Castro (2003).

2.6.5 Rodovia SP-147 (Piracicaba a Limeira)

Em dezembro de 2004 foi executado um trecho experimental nesta rodovia. Nela utilizou-se uma emulsão especialmente formulada para tal técnica de reciclagem. A emulsão tinha a função de dar coesão, rigidez inicial, elevada durabilidade e possibilitar ainda a rápida abertura ao tráfego. O resultado foi tão satisfatório que foi usado esta emulsão especial para restaurar 35 km desta rodovia com a reciclagem (DAVID, 2006 apud LIBERATORI; CONSTANTINO; TUCHUMANTEL, 2005).

2.6.6 Rodovia SC-303 (BR-282 - Joaçaba a Capinzal)

Segundo Trichês e Santos (2011), entre os anos de 2006 e 2007 foi executada a reciclagem com a adição de cimento nesta rodovia, num trecho de 30 km.

A UFSC vem monitorando este trecho desde 2007 a fim de dar subsídios aos consultores, construtores e gestores em novos projetos de restauração de rodovias que contemplem esta tecnologia. Em 2010 foi feito um levantamento das condições superficiais do pavimento onde se encontrou aproximadamente 3,5% de patologias referentes ao desempenho da reciclagem. É um número alto considerando-se que a rodovia foi liberada ao tráfego a 3 anos. Em 84% das seções não apresentam qualquer tipo de patologia, as patologias predominam no lado direito da rodovia indicando assim um tráfego mais pesado nesta direção.

A Figura 10 mostra a execução da reciclagem com adição de cimento na rodovia SC-303.

Figura 10 – Execução da Reciclagem na SC-303.



Fonte: Trichês e Santos (2011).

2.6.7 Rodovia SC-303 (SC-135 - Videira a Tangará)

O trecho de 24,1 km está com as obras em andamento. Estão previstos vários serviços na recuperação e readequação da rodovia, entre elas a reciclagem do pavimento. A técnica de restauração adotada será a reciclagem profunda com adição de cimento e obra está orçada em aproximadamente 53 milhões de reais.

2.6.8 Rodovia SC-480 (São Lourenço do Oeste a São Domingos)

O trecho de 45 km foi inaugurado em janeiro de 2014 pelo DEINFRA/SC. A obra teve investimento na ordem de 37,7 milhões de reais e foi concluída com praticamente um ano de antecipação, já que o cronograma previa conclusão em dezembro de 2014. A obra contemplou reciclagem do pavimento com adição de cimento e aplicação de asfalto borracha com aproveitamento de 99,4mil pneus usados.

2.6.9 Rodovias RS-122 (Ipê – Localidade de Samuel) e RSC-453 - Rota do Sol (Caxias do Sul – Lajeado Grande)

Parte integrante do Lote II do Crema Serra, a rodovia RSC-453 iniciou as obras de restauração e manutenção no mês de fevereiro de 2014. A técnica de restauração será a reciclagem profunda com adição de cimento e espuma de asfalto, numa extensão de 52,92 km. Inicialmente, foram feitos testes experimentais para avaliação e aprovação do DAER/RS. A previsão de conclusões dos serviços de reciclagem está prevista para setembro 2014. As obras

do Lote II estão orçadas em aproximadamente 65,7 milhões de reais. A Figura 11 mostra os equipamentos em comboio executando a compactação da base reciclada.

Figura 11 – Execução da compactação.



2.6.10 Rodovia BR-116 – km 416 (Camaquã/RS)

A Empresa Concessionária de Rodovias do Sul S.A. - ECOSUL fará em 2015, um trecho experimental de restauração do pavimento flexível na BR-116 adotando a técnica de reciclagem profunda a frio. Não foi definido ainda qual agente estabilizador será incorporado na mistura reciclada. A profundidade de execução da reciclagem será em torno de 0,30m e conforme necessidade ainda será tratada a camada da sub-base existente.

2.7 Mecânica dos Pavimentos

A mecânica dos pavimentos possibilita estudar o comportamento estrutural do pavimento, permitindo assim estabelecer para pavimentos novos e para as restaurações, projetos racionais.

Segundo Medina (1998) a mecânica dos pavimentos estuda os pavimentos como sistemas em camadas e sujeitos às cargas dos veículos. O sistema consiste de uma ou mais camadas de material colocadas sobre o subleito provido de um revestimento adequado ao rolamento de cada veículo.

Vale e Melo (2006) sugerem o uso do modelo numérico para se obter as respostas que desejamos para nossos pavimentos. Citam ainda que um modelo é um sistema físico, matemático ou lógico que representa o essencial da realidade, permitindo ao investigador ou ao projetista conhecer e reproduzir essa realidade.

Vale e Melo (2006) apresentam resultados obtidos em um modelo numérico para averiguar a influência da temperatura no comportamento visco-elástico dos materiais betuminosos, mostrando que a simples variação de 20 °C para 40 °C muda completamente o comportamento do pavimento, gerando deformações significativas. Isso nos conduz a considerar sim modelos numéricos para análises do comportamento mecânico dos pavimentos.

A definição de mecânica dos pavimentos para Pinto e Preussler (2002) em síntese é “projetar um pavimento considerando o estado de tensões e deformações atuantes, compatibilizando-os com as admissíveis ou resistentes, para um período de projeto e condição de serventia”.

Um pavimento flexível bem concebido deve atender a três limitações:

- a) Deformações permanentes;
- b) As deformações são recuperáveis ou elásticas;
- c) Tensões que passam a provocar ruptura por cisalhamento.

Quando o pavimento é dimensionado em função do CBR, busca-se garantir a resistência à ruptura por cisalhamento, bem como as deformações permanentes. Mas o pavimento pode romper por fadiga do revestimento betuminoso se não for levado em consideração o limite admissível das deformações elásticas para o número “N” de projeto.

Através de ensaios laboratoriais, onde são simuladas condições de carregamento similares aos de campo, é possível determinar o módulo de elasticidade ou resiliente sob as diferentes condições de umidade, a densidade, a tensão confinante, a tensão desvio, a frequência, a duração e a repetição do carregamento.

É relevante e é fundamental que os resultados obtidos para determinados materiais, sejam aplicados na região em que foi desenvolvido o estudo. Caso contrário corre-se o risco de se ter resultados absurdos na aplicação da mecânica dos pavimentos.

2.7.1 Métodos mecanísticos

Os métodos mecanísticos analisam as tensões e deformações com base na teoria da elasticidade aplicada em meios elásticos, e verificam o dimensionamento das espessuras de qualquer camada do pavimento utilizando programas computacionais, com base nas teorias:

- a) **Teoria de Boussinesq** (França, 1885) – meios homogêneos, isotrópicos e linearmente elásticos;
- b) **Método de Burmister** (EUA, 1943) – cálculo de tensões e deslocamentos em sistemas de camadas elásticas;
- c) **Método de Odemark** (Suécia, 1949) – método das espessuras equivalentes.

Neto (2004) cita que neste tipo de análise tem-se um panorama de funcionamento da estrutura solicitada, possibilitando modificações nos materiais constituintes ou ainda em suas espessuras de cada camada. A análise mecanística possibilita proporcionar um desempenho adequado para cada um dos materiais do pavimento e conseqüentemente um conjunto que seja solicitado de forma equilibrada a fim de evitar a ruptura precocemente.

Um dimensionamento com base nas teorias elásticas possibilita uma compatibilização das espessuras com as características dos materiais, proporcionando se obter uma melhor distribuição de tensões conforme o material disponível.

Os indicadores mais importantes do comportamento estrutural são:

- a) A deflexão na superfície;
- b) A deformação de tração na fibra inferior do revestimento;
- c) E as tensões e deformações verticais no subleito.

A AASHTO (1986) descreve as seguintes vantagens na utilização do método mecanístico no dimensionamento de pavimentos flexíveis:

- a) Melhor confiabilidade no projeto;
- b) Possibilidade de prever defeitos específicos;
- c) Possibilidade de extrapolação de resultados de laboratório e de campo;
- d) Maior compatibilização entre custo e benefício das obras;
- e) Possibilidade de prever as conseqüências de novas configurações de carregamento;
- f) Melhor utilização dos materiais disponíveis;
- g) Possibilidade de se considerar explicitamente os efeitos sazonais.

Mahler e Motta (1982) citam como uma das principais dificuldades a seleção de um modelo tensão-deformação adequado para representar a estrutura, a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais das camadas sob condições de clima e carregamento e a definição de um critério que represente a fadiga e a ruptura.

Motta (1991) apresentou um método mecanístico de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Motta (1991) cita que adotando uma estrutura inicial, define-se a variabilidade dos dados e o nível de confiabilidade a ser utilizado no projeto. A análise mecanística é realizada com um programa computacional, usando um modelo elástico linear para o revestimento asfáltico e elástico não-linear para as camadas subjacentes, verificando-se as tensões e deformações e comparando-as com critérios de aceitação pré-estabelecidos. Caso algum critério não seja atendido, as espessuras ou camadas são alteradas e os cálculos são refeitos. Os critérios que podem ser adotados são os seguintes: deflexão máxima admissível na superfície, diferença de tensões no revestimento, tensão vertical admissível no topo do subleito e tensão e deformação de tração na fibra inferior do revestimento. Como alguns destes critérios se superpõem quanto à finalidade, alguns podem ser dispensados, escolhendo-se um para evitar trincamento por fadiga e outro para prevenir deformações permanentes excessivas.

Neto (2004) cita que após a década de 1970, com o avanço da computação, foram desenvolvidos muitos sistemas de cálculo de tensões e deformações para pavimentos asfálticos e de concreto. Entre os programas podemos citar: BISAR, CHEVRON, WESLEA, ELSYM5, KENLAYER, FEPAVE, FEPAVE2, ECOROUTE e EVERPAVE.

Podemos citar ainda os programas RIOPAVE, ILLIPAVE, SADISTIC, PAVIMENTOS, EVERSERIES e SISPAV.

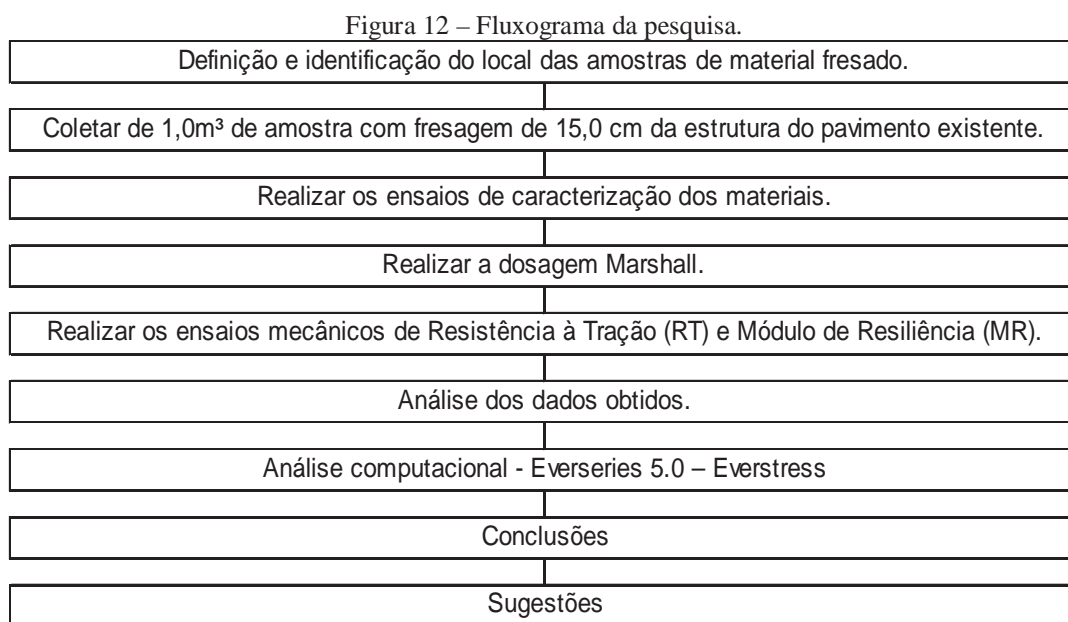
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a realização deste estudo, inicialmente, foi feito um fluxograma de trabalho, escolhido o local de extração dos materiais e realizado a caracterização dos materiais que foram utilizados na pesquisa. Na sequência foram realizadas as dosagens, as moldagens dos corpos-de-prova e os ensaios mecânicos. Ao final foram obtidos os resultados dos ensaios mecânicos e da análise mecanística para posterior análise e discussão.

Toda a preparação e ensaios foram realizados no laboratório de pavimentação da SBS Engenharia e Construções S.A., com exceção do ensaio de compressão diametral e triaxial que foi realizado no laboratório de pavimentação (LPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.1 Fluxograma do experimento

A Figura 12 mostra o desenvolvimento que foi previsto para a pesquisa.



3.2 Local da coleta e do estudo

O material fresado utilizado nesta pesquisa é proveniente da Rodovia BR-116 no km 528+000 na cidade de Pelotas. O material foi extraído através de uma simulação do processo

de reciclagem utilizando uma Fresadora Wirtgen W1000. A produção de material fresado foi o equivalente a cerca de 1.000,00 m²/dia. Trabalhou-se na velocidade mínima de avanço da fresadora para manter a constante de mistura. Importante lembrar que as recicladoras podem ter produções próximas de 10.000,00 m²/dia já contemplando o processo de fresagem, mistura e espalhamento da mistura reciclada. As obras de reciclagem já executadas no Brasil chegaram próximo de 8.000,00 m²/dia. A Figura 13 mostra a fresadora iniciando o processo de fresagem do pavimento para posterior coleta da amostra.

Figura 13 – Processo de fresagem.



Após a fresagem foi feita a coleta do material fresado em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. A coleta foi feita com uso de pá e sacos para acondicionamento e posterior transporte até o laboratório. A amostra é resultado de uma camada, já degradada, composta por aproximadamente 5cm de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) e 10cm de base de brita graduada (BGS).

A Figura 14 apresenta uma parte do material coletado e acondicionado para a secagem em temperatura ambiente.

Figura 14 – Parte da amostra de material fresado.



3.3 Caracterização dos Materiais

3.3.1 Material Fresado

Uma amostra do material coletado foi quarteada para posterior realização do ensaio de granulometria por peneiramento conforme a norma DNER-ME 083/98. O ensaio foi realizado com a amostra na forma em que foi coletada a fim de simular a condição o mais real possível de execução em campo.

Para a referência de granulometria foi adotada a especificação DNER-ES 303/97. O enquadramento da faixa, segundo a norma é em função do número “N”. Como o estudo não se trata de um projeto real de restauração de uma rodovia e sim visa apenas avaliar o comportamento mecânico das amostras com a adição de agentes estabilizadores, será adotada a relação de proximidade da granulometria encontrada nas amostras para o enquadramento da faixa das misturas.

O Quadro 19 apresenta as faixas granulométricas para bases estabilizadas segundo o DNIT.

Quadro 19 – Faixas Granulométricas para base estabilizada.

Tipos	Para N> 5x10 ⁶				Para N< 5x10 ⁶		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

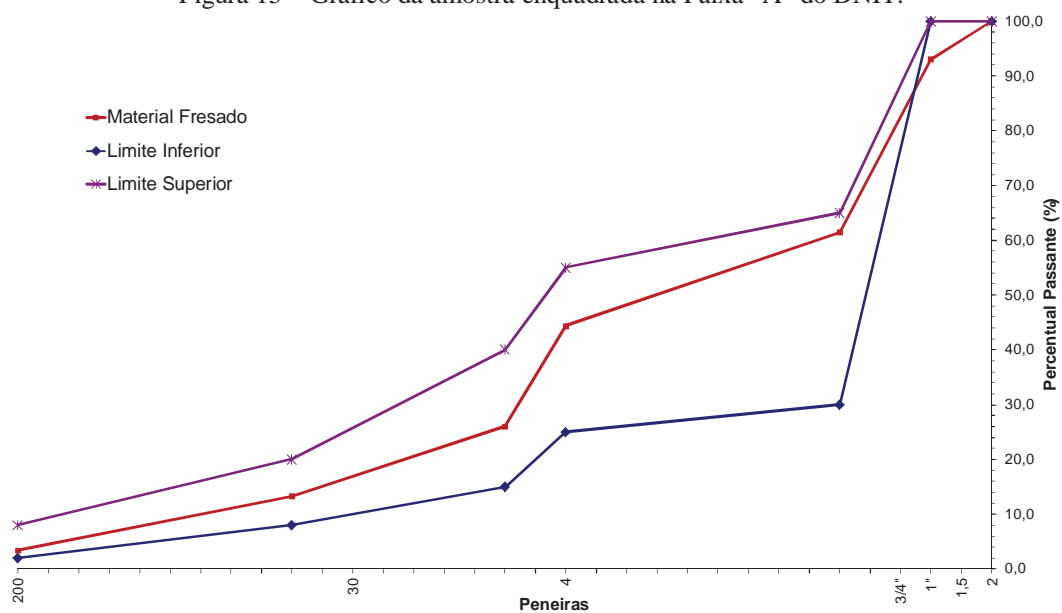
Fonte: DNIT (2012).

Foi realizado o enquadramento dentro das faixas granulométricas do DNIT para bases estabilizadas, onde os resultados são apresentados no Quadro 20 e na Figura 15. Após o peneiramento e enquadramento dentro das faixas granulométricas para bases estabilizadas apresentadas pelo DNIT, verificou-se que a amostra não necessitaria de correção nas peneiras, ou seja, não teria adição de agregado. O não atendimento em alguma peneira pode estar relacionado com a ação da trituração durante o processo de fresagem.

Quadro 20 – Análise granulométrica na faixa do DNIT.

Peneiras	Amostra (%)	DNIT - FAIXA "A"	
		Limite Inferior (%)	Limite Superior (%)
2"	100,0	100,0	100,0
1"	93,0	100,0	100,0
3/8"	61,5	30,0	65,0
Nº 4	44,4	25,0	55,0
Nº 10	26,0	15,0	40,0
Nº 40	13,3	8,0	20,0
Nº 200	3,4	2,0	8,0

Figura 15 – Gráfico da amostra enquadrada na Faixa “A” do DNIT.



Foi realizado também um ensaio de granulometria para o enquadramento nas faixas granulométricas segundo a orientação da ARRA (2001). As faixas sugeridas para bases recicladas pela ARRA são apresentadas no Quadro 21. Os resultados obtidos no ensaio estão apresentados no Quadro 22 e na Figura 16.

Quadro 21 – Faixas Granulométricas segundo a ARRA.

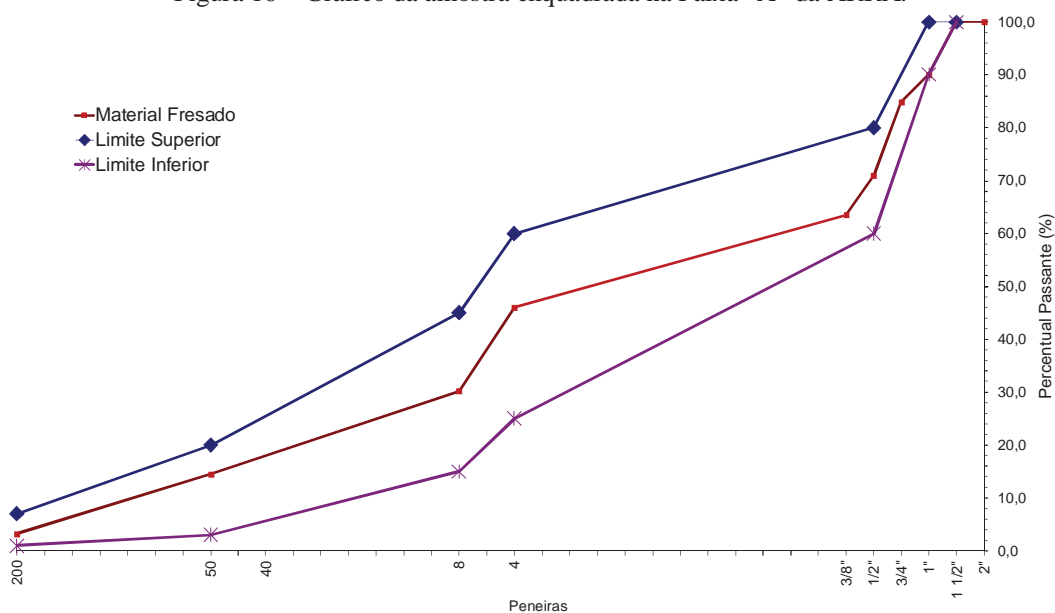
Tamanho da Peneira		A	B	C	D
		Porcentagem Passando			
1 1/2"	40mm	100			
1"	25mm	90-100	100		
3/4"	20mm		90-100	100	
1/2"	12,5mm	60-80		90-100	100
3/8"	9,5mm		60-80		90-100
4	4,75mm	25-60	35-65	45-75	60-80
8	2,16mm	15-45	20-50	25-55	35-65
50	0,300mm	3-20	3-21	6-25	6-25
200	0,075mm	1-7	2-8	2-9	2-10

Fonte: ARRA (2001).

Quadro 22 – Análise granulométrica na faixa da ARRA.

Peneiras	Amostra (%)	ARRA - FAIXA "A"	
		Limite Inferior (%)	Limite Superior (%)
2"	100,0		
1 1/2"	100,0	100,0	100,0
1"	90,1	90,0	100,0
3/4"	84,9		
1/2"	71,0	60,0	80,0
3/8"	63,5		
4	46,0	25,0	60,0
8	30,2	15,0	45,0
50	14,5	3,0	20,0
200	3,2	1,0	7,0

Figura 16 – Gráfico da amostra enquadrada na Faixa "A" da ARRA.



Observa-se que a curva granulométrica se enquadra dentro da Faixa "A" que a ARRA sugere para bases recicladas sem necessidade de adição de agregado para correção.

Como a mistura apresenta-se bem distribuída optou-se em não adicionar agregado virgem na mistura para homogeneizar melhor.

3.3.2 Emulsão

A emulsão utilizada nesta pesquisa foi preparada especificamente para este trabalho pela empresa Betunel. A emulsão chama-se Estabisol e foi preparada a partir de amostra de material fresado encaminhada anteriormente ao laboratório da Betunel. A emulsão possui 50,5% de resíduo, ou seja, 50,5% de ligante pura e 49,5% de água.

Foram realizados ensaios de caracterização na emulsão recebida para a utilização na pesquisa. Como não há uma norma para esta emulsão específica para reciclagem, não foi possível comparar os resultados segundo o DNIT. No Quadro 23 são apresentados os resultados obtidos em laboratório.

Quadro 23 – Resultados obtidos em laboratório.

CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ESTABISOLO		
Características	Resultados	
	Betunel	Ensaio
Viscosidade Saybolt-Furol:SSF a 50°C	-	12,0 s
Destilação: resíduo, % mínimo, em peso	50,5%	48,9%

3.3.3 Cimento Portland

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland do tipo CP-IV 32, que é um dos mais ecológicos do ponto de vista de sua produção e consumo de clínquer, perdendo apenas para o CP-III. O alto teor de pozolana, entre 15 e 50%, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. É altamente eficiente em concreto para pavimentos e solo-cimento. Foi realizado o ensaio de finura na peneira #200 segundo a NBR 11579/91 para o cimento que foi utilizado na pesquisa. O resultado obtido é apresentado no Quadro 24.

Quadro 24 – Resultado obtido no Ensaio de Finura.

DETERMINAÇÃO DE FINURA NA PENEIRA Nº200		
Característica	Resultados	
	CP-IV 32	Ensaio
Determinação pela NBR 11579/91	≤ 8,0%	3,6%

3.4 Dosagem Marshall da Mistura Reciclada

Segundo Bernucci et al. (2008), o método de dosagem Marshall de misturas asfálticas é o mais utilizado no país. Foi desenvolvido durante a 2ª Guerra Mundial, pelo corpo de engenheiros do exército americano (USACE) para definir a composição de agregado e ligante capaz de resistir às cargas oriundas das aeronaves militares.

O método consiste na moldagem de corpos-de-prova padronizados com composição de agregado e ligante para determinação posterior das propriedades físicas e mecânicas. O método Marshall para misturas quentes é padronizado pela DNER-ME 043/95, enquanto que para misturas a frio com emulsão asfáltica é a DNER-ME 107/94.

Neste estudo foi feita a dosagem Marshall para se encontrar o Teor Ótimo de Projeto (TOP) para cada condição de adição e depois foram moldados os corpos-de-prova em TOP para a obtenção das Resistências à Tração por Compressão Diametral (RT) e os Módulos de Resiliência (MR).

3.4.1 Água de Molhagem

A adição de água de molhagem é recomendável para misturas asfálticas a frio para proporcionar um melhor envolvimento dos materiais pelo ligante. Santana (1993) indica misturas experimentais para a determinação do teor de água de molhagem, a fim de identificar a trabalhabilidade e o envolvimento dos materiais. FHWA (2002) indica a realização de dosagem preliminar para a determinação do teor de umidade.

Foram realizadas dosagens preliminares para as misturas de material fresado com a adição de emulsão, material fresado com adição de emulsão e cimento e material fresado com adição de cimento. Os teores de emulsão e cimento foram de 3% para ambos, enquanto que a adição da água foi de 2%, 3% e 4% em cada dosagem com adição simples e 5%, 6% e 7% para a dosagem combinada preliminar. O teor para a água de molhagem ficou definido por experimentação em 6,5% para a dosagem de material com adição de cimento, em 3,0% para a dosagem de material com adição de emulsão e em 3,0% para a dosagem de material com adição combinada de emulsão e cimento.

A Figura 17 mostra a adição de água durante a preparação das amostras, enquanto que na Figura 18 é mostrada a mistura sendo homogeneizada para ser colocada no cilindro Marshall.

Figura 17 – Preparação da mistura.



Figura 18 – Homogeneização da mistura.



3.4.2 Moldagem dos corpos-de-prova

A moldagem dos corpos-de-prova seguiu conforme é preconizado na norma Marshall. A pesagem das amostras, adição de agente estabilizador, homogeneização da mistura, acondicionamento nos moldes, compactação e cura em estufa foram os passos realizados para todas as misturas.

Foram moldados três corpos-de-prova para cada teor de emulsão, sendo os cilindros com medidas de 101,6 mm de diâmetro por 63,5 mm de altura e cada fração de amostra com

950 g, totalizando quinze corpos-de-prova para cada mistura. Os teores variaram de 2% a 4% com incremento de 0,5% para as misturas com adição de cimento e para as misturas com adição de emulsão. O teor de partida foi definido anteriormente em 3% para o cimento e 3% para a emulsão, baseado em pesquisas e experiência profissional. Nas misturas com adição combinada de cimento e emulsão, o cimento teve adição variada de 2% a 4% com incremento de 0,5%, enquanto que a emulsão partiu do teor ótimo de projeto (TOP) obtido na adição simples de emulsão tendo adição -1,0%, -0,5%, +0,5% e +1,0%.

A Figura 19 apresenta as amostras sendo preparadas, moldadas e colocadas em estufa.

Figura 19 – Moldagem dos corpos-de-prova.



A opção em seguir a moldagem Marshall partiu da leitura de outros trabalhos que contemplavam a adição de cimento. A Betunel indicou a realização de proctor como sendo a melhor opção para a mistura com adição de emulsão. Por intermédio da dosagem Marshall a mistura com emulsão obteve resultado de teor ótimo de projeto (TOP) similar aos resultados obtidos pela Betunel em outros ensaios utilizando Proctor. Sendo assim, a opção de método de dosagem não interferiu significativamente no resultado de TOP.

A moldagem dos corpos-de-prova seguiu os procedimentos descritos a seguir.

3.4.2.1 Secagem do material fresado

O material fresado foi acondicionado e deixado secar em temperatura ambiente por cerca de 24 horas, a fim de ter uma amostra o mais próximo da condição de campo, uma vez que o processo de reciclagem é contínuo sem espera para secagem do material fresado e sem algum processo de secagem durante a execução. A umidade do material fresado foi verificada no laboratório apresentando-se em torno de 1%.

3.4.2.2 Fracionamento do material fresado

Após a secagem em temperatura ambiente o material fresado foi separado em amostras menores. Não foi realizado o fracionamento do material, a fim de se ter corpos-de-prova que refletissem a granulometria o mais próximo da condição original de campo. Através de ensaios de granulometria das amostras se verificou que a mistura pode ser considerada homogênea já que não houve alterações significativas em nenhuma das peneiras.

3.4.2.3 Pesagem das amostras

As amostras foram pesadas partindo de um corpo-de-prova chamado de pioneiro para se ter o peso de amostra necessária para a confecção dos corpos-de-prova na dosagem. O pioneiro é obtido através de tentativas a fim de se obter a quantidade, em peso, de material para que ao ser compactado no molde não falte e nem sobre material, e assim sejam validados os dados obtidos antes, durante e depois da compactação do corpo-de-prova. Após as tentativas, chegou-se ao peso de 950 g de amostra para se confeccionar cada corpo-de-prova, com medidas de 101,6mm de diâmetro e 63,5mm de altura.

3.4.2.4 Adição da água de molhagem

A água de molhagem foi definida inicialmente para que ao moldar as misturas em estudo já se tivesse definido o teor a ser aplicado. Foi definido através de uma dosagem Marshall preliminar das misturas previstas e com adição de emulsão e cimento pré-definidos.

3.4.2.5 Homogeneização e adição do agente estabilizante

Após adicionar a água de molhagem, a amostra foi misturada de forma que a água ficasse homogeneizada com o material fresado. Nas misturas que receberam adição de cimento, foi adicionado o cimento e homogeneizada a mistura para então receber a água de molhagem. Isso se fez necessário para se ter uma boa e bem distribuída mistura. Nas misturas que receberam a emulsão, o agente estabilizante foi adicionado logo após a homogeneização da mistura.

A Figura 20 mostra uma amostra homogeneizada recebendo a adição do agente estabilizante.

Figura 20 – Adição de emulsão.



Após a adição do agente estabilizante, a mistura é homogeneizada novamente, ficando preparada para a confecção do corpo-de-prova, conforme mostra a Figura 21. Foi aguardado cerca de 15 minutos para a moldagem, a fim de aguardar o início da ruptura da emulsão.

Figura 21 – Adição de emulsão.



Foram moldados inicialmente 27 corpos-de-prova para a determinação do teor da água de molhagem. Para estes corpos-de-prova foram adotados teores de 3% fixos para cimento e emulsão, sendo variado apenas o teor de água (2%, 3% e 4% para adição simples de emulsão e adição combinada de cimento e emulsão; 5%, 6%, 7% e 8% para a adição simples de cimento). Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada teor de água em cada adição, totalizando 30 corpos-de-prova para as três adições (cimento, emulsão e cimento + emulsão).

Foram moldados 45 corpos-de-prova, sendo 15 para cada mistura prevista, ou seja, 15 corpos-de-prova para misturas com adição simples de cimento, 15 corpos-de-prova para misturas com adição simples de emulsão e 15 corpos-de-prova com adição combinada de cimento e emulsão. Com estes corpos-de-prova foi possível se chegar ao teor ótimo de projeto das misturas (TOP).

Tendo o TOP de cada mistura foram moldados 36 corpos-de-prova, sendo 12 para cada mistura para a realização dos ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência.

3.4.2.6 Umidade para a compactação

Conforme descreve a norma DNER-ME 107/94, as amostras devem aguardar o processo de ruptura da emulsão antes da compactação. A norma descreve que a mistura deve curar à temperatura ambiente de 4 a 6 horas para então ser iniciada a compactação. Cita ainda que em

caso de emulsão de ruptura lenta o período de cura deve ser no máximo 60 minutos.

Cross (2003), em sua pesquisa, concluiu que as amostras podem ser compactadas antes ou depois da cura da emulsão sem causar efeito significativo. Assim, neste trabalho foi aguardado cerca de 15 minutos para então iniciar a compactação das amostras.

3.4.2.7 Compactação dos corpos-de-prova

A compactação dos corpos-de-prova foi feita à temperatura ambiente utilizando um compactador mecânico Marshall elétrico, aplicando 75 golpes em cada face com carga e intensidade constante.

A Figura 22 mostra o equipamento utilizado na compactação.

Figura 22 – Compactador mecânico Marshall.



Após a compactação, os corpos-de-prova foram colocados com molde na estufa a 60 °C por 24 horas para a cura, conforme descreve a norma DNER-ME 107/94. Após o período de cura, retiraram-se os corpos-de-prova da estufa e foi aguardado o esfriamento à temperatura ambiente por 2 horas. Em seguida foram extraídos os corpos-de-prova dos moldes e acondicionado em lugar limpo, liso e plano com identificação de cada mistura.

A Figura 23 mostra os corpos-de-prova preliminares extraídos dos moldes.

Figura 23 – Corpos-de-prova preliminares extraídos dos moldes.



3.4.3 Determinação da massa específica aparente

Em cada corpo-de-prova foi determinada a altura por média de quatro leituras diametralmente opostas e a massa específica aparente segundo o método DNER-ME 117/94, adotando o procedimento descrito no item 6.3 da norma, que contempla mistura com mais de 10% de vazios. A Figura 24 mostra os corpos-de-prova recobertos com fita e sendo parafinados para então serem submetidos ao ensaio para determinação da massa específica aparente conforme preconiza a norma.

Figura 24 – Corpos-de-prova sendo parafinados.



3.4.4 Determinação da massa específica máxima medida

A determinação da massa específica máxima medida seguiu as orientações da norma ASTM-D2041/2000. Este ensaio é utilizado para determinar o volume de vazios da mistura. O ensaio é realizado através da mistura na condição solta, acondicionada em recipiente, preenchido com água destilada e submetido ao vácuo com pressão de 30 mmHg por aproximadamente 15 minutos a fim de eliminar todo ar existente na mistura asfáltica. Tendo o peso seco da amostra, peso do frasco com água e peso do frasco com a amostra com nível cheio de água após a aplicação do vácuo, encontra-se a massa específica máxima da mistura.

Foram ensaiadas amostras para cada mistura reciclada estudada e a Figura 25 mostra o equipamento do método RICE.

Figura 25 – Conjunto de equipamentos do método RICE.



3.4.5 Volume de vazios

O volume de vazios foi obtido a partir dos resultados da massa específica máxima teórica (DMT) e da massa específica aparente (G_{mb}). Para o cálculo do volume de vazios foi utilizado a massa específica máxima medida obtida no RICE. Com os valores destas massas se aplica a equação (1):

$$VV = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \quad (1)$$

3.4.6 Estabilidade e Fluência

A estabilidade e a fluência foram obtidas conforme a norma DNER-ME 107/94, que orienta o procedimento do ensaio em misturas a frio. O ensaio consiste em pegar os corpos-de-prova compactados e curados (24 horas em estufa à temperatura de 60 °C, depois 2 horas em temperatura ambiente à temperatura de 25 °C), colocar em estufa à temperatura de 40 °C por 2 horas e então ensaiar na prensa Marshall. O corpo-de-prova é colocado no molde de compressão da própria prensa e então é aplicada a carga através do equipamento. Após as leituras são feitas as correções necessárias e tomado anotação da constante da prensa para então calcular os valores para a estabilidade e fluência.

Para cada mistura se obteve resultados diferentes, o que era de se esperar já que são misturas com adições estabilizantes diferentes.

A Figura 26 mostra um corpo-de-prova sendo submetido à prensa Marshall para se obter a leitura da estabilidade e leitura da fluência, que são propriedades mecânicas das misturas.

Figura 26 – Corpo-de-prova sendo ensaiado na prensa Marshall.



3.5 Propriedades mecânicas

3.5.1 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Bernucci et al. (2008) cita que o ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da resistência à tração (RT) foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro para concreto de cimento Portland.

O ensaio considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro. Desde 1972 este ensaio tem sido adotado para caracterização de misturas asfálticas. O ensaio é padronizado pelo DNER-ME 138/94.

Os ensaios de RT foram realizados no laboratório da SBS Engenharia e Construções S.A e foram obtidos os resultados para as misturas com adição de emulsão, misturas com adição de cimento e misturas com adição combinada de emulsão e cimento. A Figura 27 mostra um exemplo de equipamento para o ensaio de RT.

Figura 27 – Equipamento para ensaio de RT.



Fonte: Bernucci et al. (2008).

3.5.2 Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência (MR) é padronizado pela NBR 16018. Segundo Bernucci et al. (2008), o ensaio de MR é realizado aplicando-se cargas repetidas no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico regular. Esta carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga. É medido o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura (T).

Neste estudo, os ensaios de módulo de resiliência foram realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, que dispunha dos equipamentos apropriados.

Foram realizados ensaios de compressão diametral com as misturas de adição simples de cimento e de adição combinada de emulsão e cimento. Todas as amostras foram moldadas em corpos-de-prova medindo diâmetro de 10,20cm por 6cm de altura. Na Figura 28 (a) temos uma amostra sendo ensaiada por compressão diametral.

As misturas de referência e com adição simples de emulsão foram ensaiadas por compressão confinada para a obtenção do MR pelo fato de que os corpos-de-prova não mantinham a estrutura por falta de agente cimentante. Assim então foi realizado o ensaio triaxial como é apresentado na Figura 28 (b)

Figura 28 (a) – Compressão diametral.



Figura 28(b) – Compressão Confinada.



3.6 Análise Computacional – Programa EVERSERIES

A análise por meio da aplicação da teoria da elasticidade permite que os profissionais testem diferentes materiais na composição estrutural do pavimento. Para a análise neste estudo foi utilizado o programa EVERSERIES 5.0 – Módulo Everstress. Através deste

módulo podem-se obter informações sobre a estrutura do pavimento que será obtido após a execução da mistura reciclada com adição de agentes estabilizadores.

Segundo WSDOT (2005), este módulo permite uma análise das camadas elásticas utilizadas na determinação das tensões, deformações e deflexões em sistemas de camadas elásticas (semi-infinito) de carga circular aplicada na superfície. Possibilita até 5 (cinco) camadas, 20 (vinte) cargas e 50 (cinquenta) pontos para análise. A Figura 29 mostra a tela inicial de entrada de dados do Everstress 5.0.

Figura 29 – Everstress 5.0 - Entrada de Dados.

Fonte: Everseries, 2005.

Para a entrada de dados no software será considerado eixo padrão de 8,2 tf, pressão dos pneus de 559,444 kPa e raio de contato dos pneus de 10,70 cm, conforme Jorge (2008).

A Tabela 1 apresenta as demais configurações necessárias para a entrada de dados do programa computacional. Os dados são baseados na experiência do autor no uso do sistema EVERSERIES e na literatura existente. Os coeficientes de Poisson e MR da base, sub-base e subleito foram extraídos dos estudos de JORGE (2008).

Tabela 1: Configurações para o software.

MATERIAL	POISSON (v)	ESPESSURA (m)	MR (Mpa)
Revestimento	0,35	0,05	3670
Base Reciclada	0,25	0,15	*
Base	0,40	0,15	195,12
Sub-base	0,40	0,15	87,08
Subleito	0,45	-	66,39

* O MR deste material foi obtido em laboratório externo.

Para a análise de incremento na estrutura do pavimento foi adotado a curva de fadiga de Salomão Pinto (2002). Esta curva atende a metodologia USACE e é baseada na informação das microdeformações originadas nas fibras inferiores do revestimento. A curva de fadiga adotada é representada pela equação 2. Para satisfazer a curva é necessário que $N_{adm} \geq N_{proj}$.

$$\text{Curva de Fadiga} \rightarrow N_{adm} = 1,21 \times ((10)^{-8}) \times (1/\epsilon_t)^{2,66} \times f_0 \quad (2)$$

Onde:

N_{adm} - número de repetições de carga para ruptura por fadiga;

ϵ_t - deformação específica resiliente de tração na fibra inferior do revestimento, cm/cm;

f_0 - fator laboratório - campo = 10^5 .

Importante lembrar que o ideal seria elaborar a curva de fadiga para a mistura asfáltica de revestimento adotada, pois cada mistura tem sua característica. Neste trabalho o foco é a base reciclada com adição de agentes, sendo assim a curva de fadiga adotada atenderá satisfatoriamente, uma vez que a camada de revestimento não está em estudo.

3.6.1 Dados de entrada para cada mistura

A estrutura do pavimento flexível para este estudo foi analisada considerando um número de repetições de um Eixo Simples de Roda Dupla (ESRD) de 8,2tf e 10tf (carga legal máxima brasileira). O objetivo de utilizar a carga de 10tf é condicionar uma carga de sobrepeso mais próxima da realidade das rodovias brasileiras. Diversos estudos apontam esta carga, entre eles o estudo de STEINER (2008).

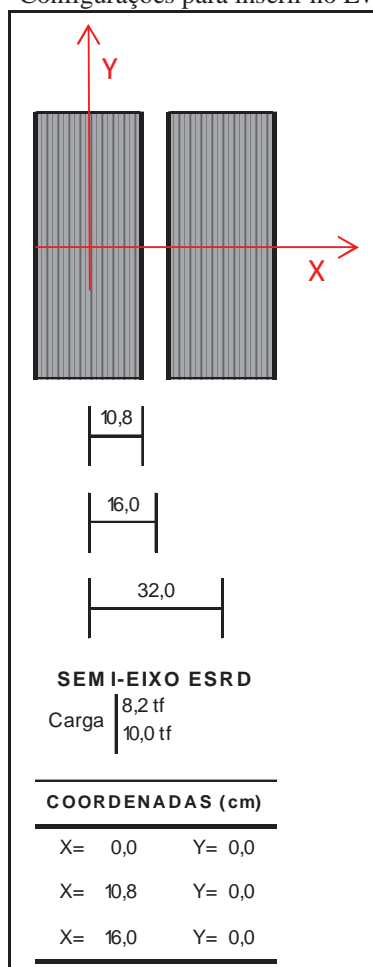
A Tabela 2 apresenta as configurações das cargas por eixo que foram adotadas neste trabalho.

Tabela 2: Dados de entrada relativos às configurações.

Carga / Eixo (tf)	Carga / Semi-eixo (tf)	Carga / Roda (tf)	Pressão do pneu (kPa)	Raio de contato (cm)
8,20	4,10	2,050	559,444	10,70
10,00	5,00	2,500	689,000	10,70

A Figura 30 apresenta um croqui com as cargas por eixo e as cotas horizontais de avaliação, que foram consideradas e introduzidas no programa Everstress 5.0 para a análise mecânica linear do pavimento em estudo neste trabalho.

Figura 30 – Configurações para inserir no Everstress 5.0.



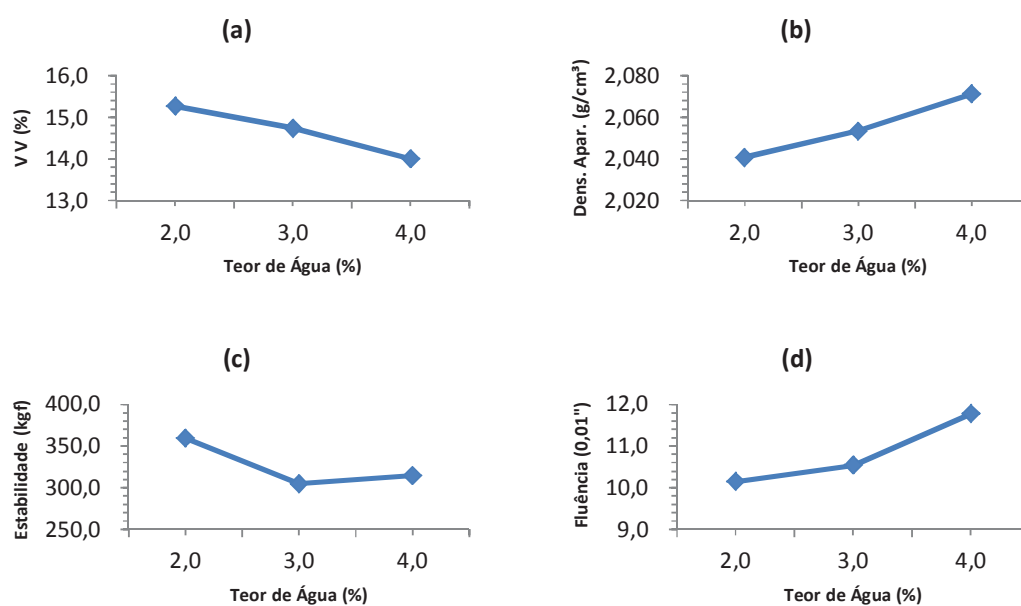
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões apresentados a seguir são com base nos resultados obtidos nos ensaios desta pesquisa. Está estruturado de forma que facilite a visualização e compreensão dos ensaios que foram realizados.

4.1 Água de Molhagem

A água de molhagem foi determinada com uma dosagem Marshall preliminar para cada uma das três misturas envolvidas neste trabalho. Fixou-se o teor em 3% para as adições simples de emulsão e cimento, e também de 3% para a adição combinada de cimento e emulsão (3% para cada agente). A quantidade de água aplicada foi de 2%, 3% e 4% para a adição simples de emulsão e para a adição combinada de cimento e emulsão. Na adição simples de cimento a água foi aplicada com 5%, 6%, 7% e 8%, pois era necessário prever além da água de molhagem, a água de hidratação do cimento na mistura. Todos os percentuais de água e agentes são em função da massa da amostra. A Figura 31 apresenta os resultados obtidos para a mistura reciclada com adição de emulsão.

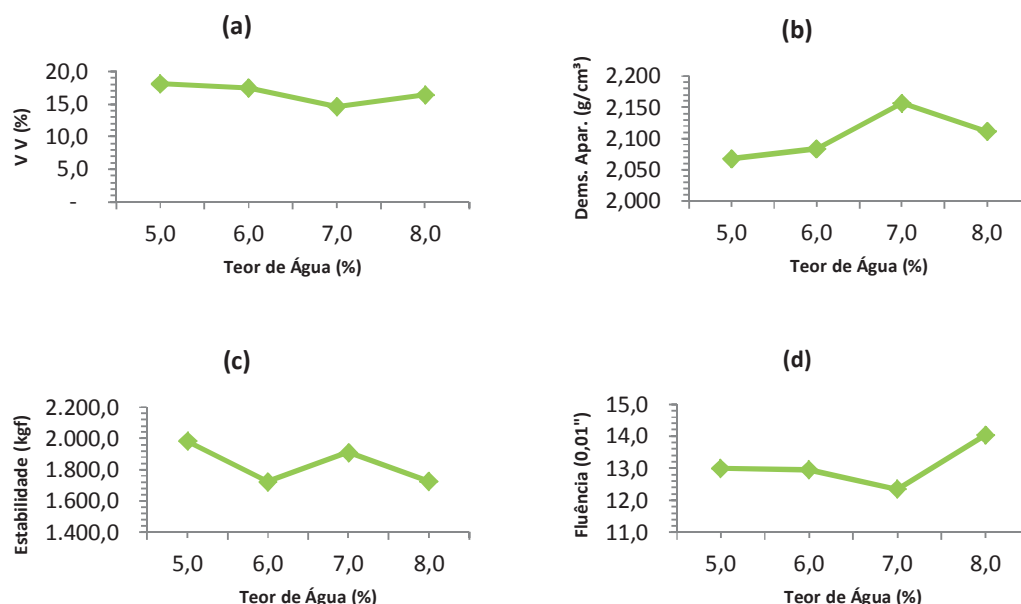
Figura 31 – Gráficos com resultados para a adição de 3% de emulsão: a) Volume de Vazios; b) Densidade Aparente; c) Estabilidade; d) Fluência.



Analisando os gráficos obtidos chega-se a conclusão de que o teor de 3,0 % de água enquadra na média dos parâmetros aqui encontrados, além de apresentar boa fluidez de mistura da composição. Assim tem-se uma mistura homogênea, atuando nas médias de cada parâmetro não prejudicando a mistura final caso haja uma variação de acréscimo de água em campo.

A Figura 32 apresenta os resultados obtidos para a mistura reciclada com adição de cimento.

Figura 32 – Gráficos com resultados para a adição de 3% de cimento: a) Volume de Vazios; b) Densidade Aparente; c) Estabilidade; d) Fluência.

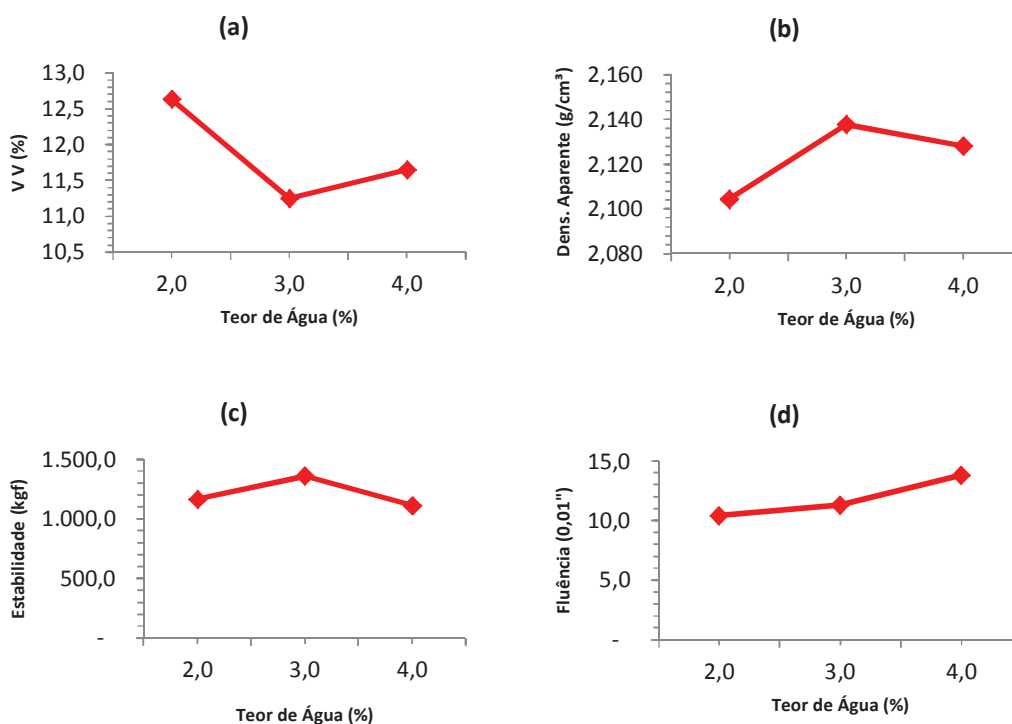


Analisando-se os resultados obtidos chega-se a conclusão de que o teor de 6,5 % de água enquadra na média dos parâmetros aqui encontrados. Assim tem-se uma mistura atuando nas médias de cada parâmetro não prejudicando a mistura final caso haja uma variação de acréscimo de água em campo.

Aqui foi necessário acompanhar a hidratação do cimento, a fim de que não houvesse fissuração por retração, por isso a elevação no teor de água. Se fosse adotado o teor de 3,0% como na mistura com emulsão, à mistura não teria fluído suficiente para o envolvimento dos agregados com o cimento e principalmente para a reação química do cimento na mistura.

A Figura 33 apresenta os resultados obtidos para a mistura reciclada com adição de cimento e emulsão.

Figura 33 – Gráficos com resultados para a adição de 3% de cimento e 3% de emulsão: a) Volume de Vazios; b) Densidade Aparente; c) Estabilidade; d) Fluência.



Analisando-se os resultados da Figura 33 chega-se a conclusão de que o teor de 3,0 % de água enquadra na média dos parâmetros. Assim tem-se uma mistura homogênea atuando nas médias de cada parâmetro não prejudicando a mistura final caso haja uma variação de acréscimo de água em campo.

Nesta análise se levou em consideração a necessidade de uma mistura com boa estabilidade e com boa fluência, uma vez que contém adição de cimento que tende a enrijecer a mistura e a adição de emulsão que deixa a mistura flexível.

Desta maneira foi obtido o Teor Ótimo de Fluido (TOF) para as misturas que é 6,5%. Ou seja, nas misturas com adições que contenham emulsão a água a ser adicionada é o TOF-TOP, enquanto que na mistura com adição de cimento a água a ser adicionada é o próprio TOF.

Nas experiências em reciclagem de pavimentos flexíveis pelo Brasil, normalmente o TOF é obtido através do ensaio de compactação Proctor. Ralph Proctor em 1933 desenvolveu a metodologia que consiste em compactar, em diferentes energias, uma porção de solo em um

cilindro com volume conhecido, variando a umidade até obter o ponto de compactação máxima, no qual se tem também a umidade ótima.

Com o objetivo de comparar os resultados foi realizado o ensaio de compactação Proctor para as 4 (quatro) misturas deste estudo, afim de obter as massas específicas máxima (MEM). Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados do Ensaio de Compactação Proctor.

Mistura	MEM (g/cm ³)	Umidade Ótima (%)
Base Reciclada de Referência	2,021	6,81
Base Reciclada + Emulsão	2,040	6,87
Base Reciclada + Cimento	2,052	7,09
Base Reciclada + Emulsão + Cimento	2,046	6,98

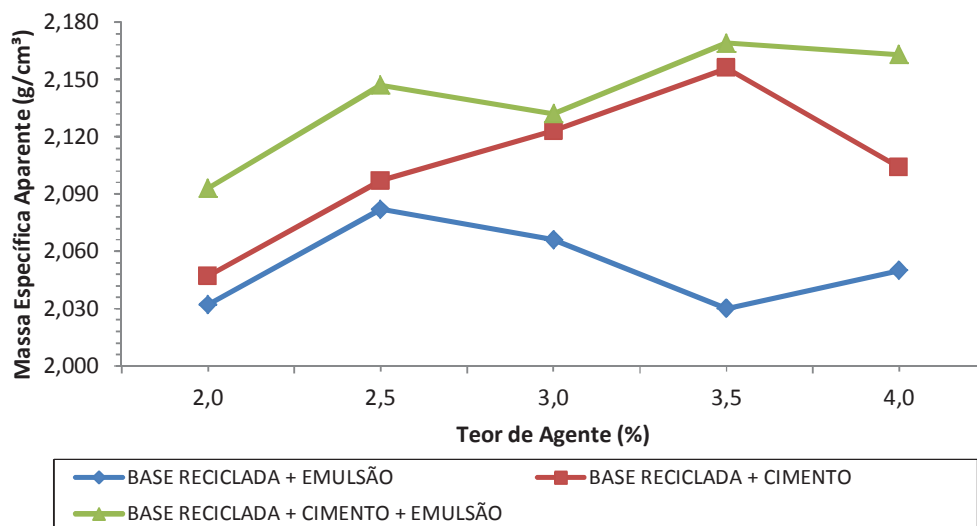
Com a média das quatro misturas obtém-se 6,9% de umidade ótima, que é o TOF obtido pelo ensaio de compactação Proctor. Considerando-se que em campo é admitido uma variação de 0,5%, para mais ou para menos, é possível dizer que o TOF de 6,5% obtido pela dosagem Marshall preliminar pode ser adotado para o estudo.

4.2 Determinação da massa específica aparente

Foram determinadas as massas específicas aparentes correspondentes a cada teor de agente utilizado. Observa-se que na adição de cimento e emulsão as massas têm um comportamento variável crescente, agregando mais densidade na mistura reciclada, enquanto que na mistura com emulsão existem variações com densidade da mistura decrescente.

Na mistura com adição de cimento a variação é crescente atingindo o pico máximo, quando então a densidade da massa começa a decrescer. Os resultados são apresentados na Figura 34 e Quadro 25.

Figura 34 – Gráfico das massas específicas aparentes.



Quadro 25: Determinação da Massa Específica Aparente (MEA).

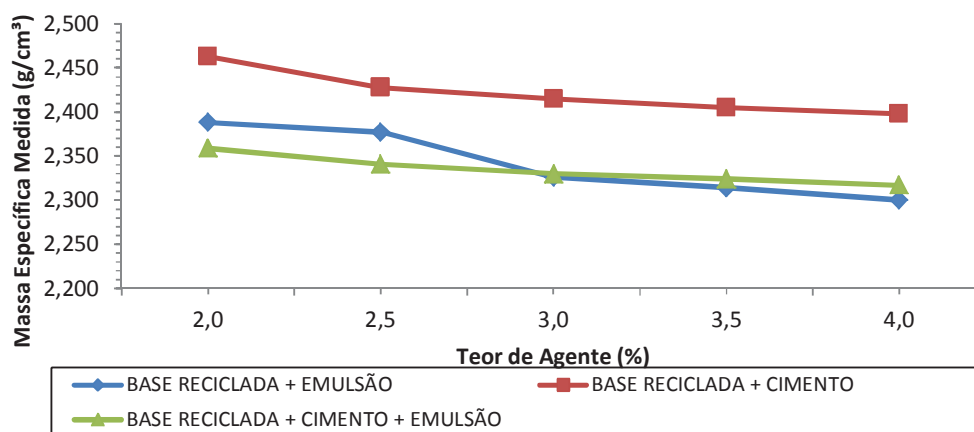
ENSAIO BASE RECICLADA COM ADIÇÃO DE EMULSÃO														
Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)
CP1	2,00	2,014	CP4	2,50	2,099	CP7	3,00	2,087	CP10	3,50	2,002	CP13	4,00	1,997
CP2	2,00	2,022	CP5	2,50	2,106	CP8	3,00	2,041	CP11	3,50	2,052	CP14	4,00	2,060
CP3	2,00	2,059	CP6	2,50	2,042	CP9	3,00	2,071	CP12	3,50	2,036	CP15	4,00	2,093
MÉDIA		2,032	MÉDIA		2,082	MÉDIA		2,066	MÉDIA		2,030	MÉDIA		2,050
ENSAIO BASE RECICLADA COM ADIÇÃO DE CIMENTO														
Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)
CP1	2,00	2,016	CP4	2,50	2,066	CP7	3,00	2,139	CP10	3,50	2,160	CP13	4,00	2,146
CP2	2,00	2,071	CP5	2,50	2,096	CP8	3,00	2,093	CP11	3,50	2,162	CP14	4,00	2,054
CP3	2,00	2,054	CP6	2,50	2,129	CP9	3,00	2,136	CP12	3,50	2,146	CP15	4,00	2,112
MÉDIA		2,047	MÉDIA		2,097	MÉDIA		2,123	MÉDIA		2,156	MÉDIA		2,104
ENSAIO BASE RECICLADA COM ADIÇÃO DE CIMENTO E EMULSÃO														
Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)	Molde	Teor (%)	MEA (g/cm³)
CP1	2,00	2,097	CP4	2,50	2,135	CP7	3,00	2,125	CP10	3,50	2,150	CP13	4,00	2,178
CP2	2,00	2,061	CP5	2,50	2,143	CP8	3,00	2,142	CP11	3,50	2,180	CP14	4,00	2,183
CP3	2,00	2,121	CP6	2,50	2,163	CP9	3,00	2,128	CP12	3,50	2,177	CP15	4,00	2,129
MÉDIA		2,093	MÉDIA		2,147	MÉDIA		2,132	MÉDIA		2,169	MÉDIA		2,163

4.3 Determinação da massa específica máxima medida

Foram determinadas as massas específicas máximas medidas correspondentes a cada teor de agente utilizado. Observa-se que nas três misturas a tendência é ir reduzindo a massa específica conforme aumenta o teor de agente. Na mistura com adição de emulsão é mais

acentuada esta perda enquanto que a mistura com adição combinada esta perda é mais linear e menor. A mistura com adição de cimento teve uma massa específica maior em todos os teores testados frente às outras misturas. Os resultados são apresentados na Figura 35 e Quadro 26.

Figura 35 – Gráfico das massas específicas máximas medidas.



Quadro 26: Determinação da Massa Específica Máxima Medida.

ENSAIO BASE RECICLADA COM ADIÇÃO DE EMULSÃO - MÉTODO RICE														
Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)
CP1	2,00	2,390	CP4	2,50	2,370	CP7	3,00	2,324	CP10	3,50	2,310	CP13	4,00	2,308
CP2	2,00	2,386	CP5	2,50	2,383	CP8	3,00	2,332	CP11	3,50	2,312	CP14	4,00	2,295
CP3	2,00	2,389	CP6	2,50	2,378	CP9	3,00	2,323	CP12	3,50	2,319	CP15	4,00	2,297
MÉDIA		2,388	MÉDIA		2,377	MÉDIA		2,326	MÉDIA		2,314	MÉDIA		2,300
ENSAIO BASE RECICLADA COM ADIÇÃO DE CIMENTO - MÉTODO RICE														
Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)
CP1	2,00	2,468	CP4	2,50	2,423	CP7	3,00	2,424	CP10	3,50	2,404	CP13	4,00	2,393
CP2	2,00	2,462	CP5	2,50	2,429	CP8	3,00	2,417	CP11	3,50	2,400	CP14	4,00	2,399
CP3	2,00	2,459	CP6	2,50	2,433	CP9	3,00	2,403	CP12	3,50	2,410	CP15	4,00	2,401
MÉDIA		2,463	MÉDIA		2,428	MÉDIA		2,415	MÉDIA		2,405	MÉDIA		2,398
ENSAIO BASE RECICLADA COM ADIÇÃO DE CIMENTO E EMULSÃO - MÉTODO RICE														
Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)	Molde	Teor (%)	DMT (g/cm³)
CP1	2,00	2,368	CP4	2,50	2,346	CP7	3,00	2,323	CP10	3,50	2,319	CP13	4,00	2,316
CP2	2,00	2,361	CP5	2,50	2,342	CP8	3,00	2,337	CP11	3,50	2,331	CP14	4,00	2,320
CP3	2,00	2,349	CP6	2,50	2,336	CP9	3,00	2,331	CP12	3,50	2,323	CP15	4,00	2,315
MÉDIA		2,359	MÉDIA		2,341	MÉDIA		2,330	MÉDIA		2,324	MÉDIA		2,317

4.4 Volume de Vazios

O volume de vazios foi obtido através das massas específicas máximas e massas específicas aparentes das misturas e teores de agentes empregados. A Figura 36 e a Tabela 4 apresentam os resultados.

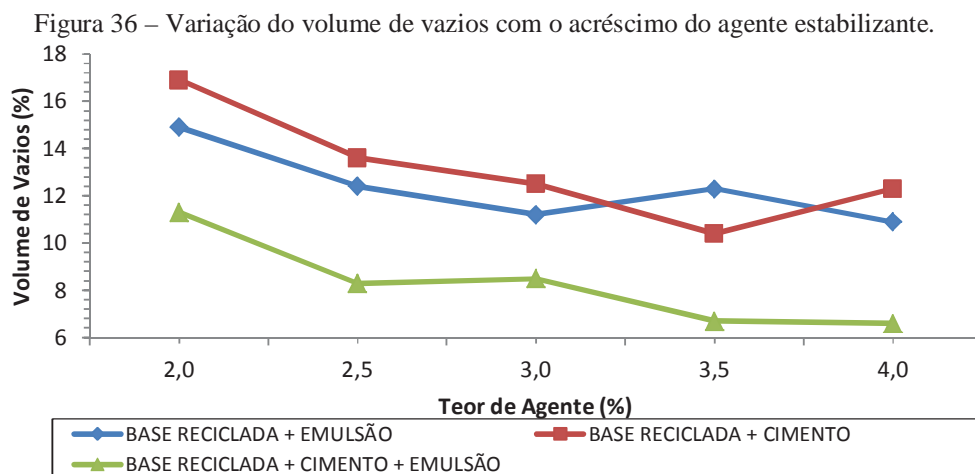


Tabela 4: Volume de Vazios das misturas.

Mistura	Teor Emulsão (%)	Teor Cimento (%)	VV (%)
BASE RECICLADA + EMULSÃO	2,0	-	14,9
	2,5	-	12,4
	3,0	-	11,2
	3,5	-	12,3
	4,0	-	10,9
BASE RECICLADA + CIMENTO	-	2,0	16,9
	-	2,5	13,6
	-	3,0	12,5
	-	3,5	10,4
	-	4,0	12,3
BASE RECICLADA + EMULSÃO + CIMENTO	3,0	2,0	11,3
	3,0	2,5	8,3
	3,0	3,0	8,5
	3,0	3,5	6,7
	3,0	4,0	6,6

Os resultados para o volume de vazios, em função dos teores de agentes, variaram em torno de 4% dentro de cada adição. A mistura combinada de emulsão e cimento foi a que obteve volume de vazios menor, possivelmente pela maior capacidade de preenchimento que os agentes geraram entre os elementos da mistura.

4.5 Estabilidade e Fluência

A estabilidade e fluência foram determinadas utilizando uma prensa Marshall mecânica manual para obterem-se os dados para posterior cálculo dos parâmetros.

A estabilidade para as misturas com adição de emulsão obteve o resultado mais baixo, enquanto que as misturas com adição de cimento, a estabilidade obteve o resultado melhor em relação às demais. A emulsão utilizada visa melhorar as propriedades de coesão e impermeabilização das misturas e não tem ação cimentante, o que justifica a baixa estabilidade deste tipo de mistura.

Nas misturas com adição de cimento Portland a estabilidade foi cerca de 5 (cinco) vezes maior quando comparada com as misturas com adição de emulsão, enquanto que observa-se que a emulsão fez reduzir a estabilidade nas misturas com adição combinada de emulsão e cimento.

A Figura 37 apresenta os resultados obtidos para a estabilidade, os quais estão resumidos na Tabela 5.

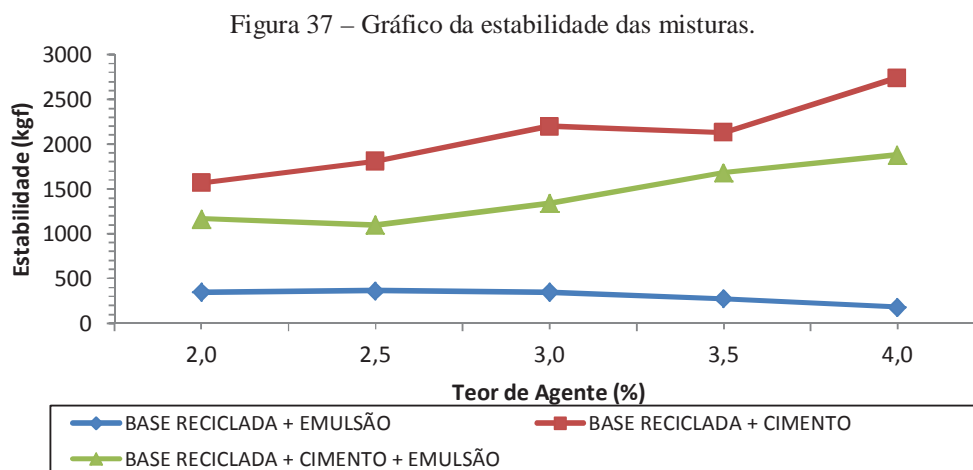


Tabela 5: Estabilidade das misturas.

Mistura	Teor Emulsão (%)	Teor Cimento (%)	Estabilidade (kgf)
BASE RECICLADA + EMULSÃO	2,0	-	348
	2,5	-	364
	3,0	-	346
	3,5	-	275
	4,0	-	182
BASE RECICLADA + CIMENTO	-	2,0	1568
	-	2,5	1812
	-	3,0	2199
	-	3,5	2131
	-	4,0	2742
BASE RECICLADA + EMULSÃO + CIMENTO	3,0	2,0	1167
	3,0	2,5	1098
	3,0	3,0	1342
	3,0	3,5	1685
	3,0	4,0	1879

A Figura 38 e a Tabela 6 apresentam os resultados obtidos para a fluência.

Figura 38 – Gráfico da fluência das misturas.

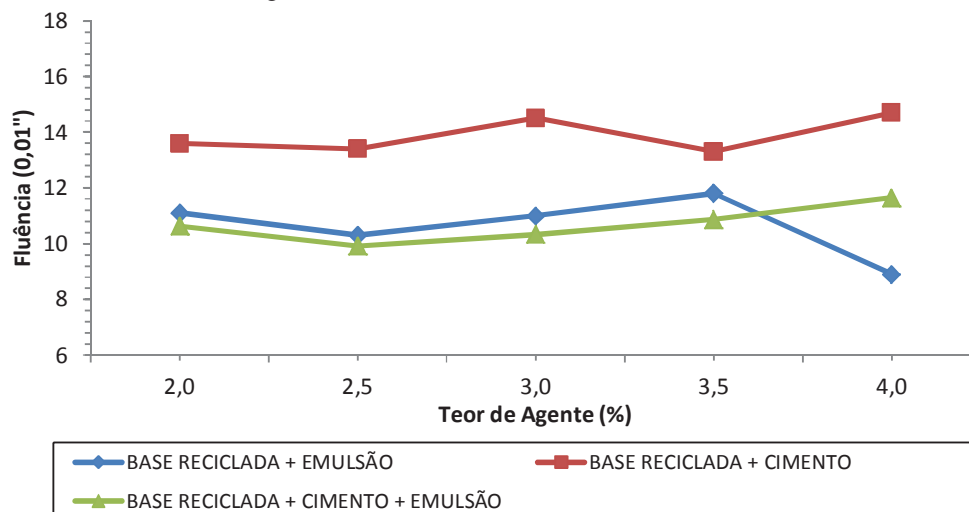


Tabela 6: Fluência das misturas.

Mistura	Teor Emulsão (%)	Teor Cimento (%)	Fluência (0,01")
BASE RECICLADA + EMULSÃO	2,0	-	11,1
	2,5	-	10,3
	3,0	-	11,0
	3,5	-	11,8
	4,0	-	8,9
BASE RECICLADA + CIMENTO	-	2,0	13,6
	-	2,5	13,4
	-	3,0	14,5
	-	3,5	13,3
	-	4,0	14,7
BASE RECICLADA + EMULSÃO + CIMENTO	3,0	2,0	10,6
	3,0	2,5	9,9
	3,0	3,0	10,3
	3,0	3,5	10,9
	3,0	4,0	11,7

Na fluência se observou um comportamento muito próximo para as misturas com adição de emulsão e com adição combinada de emulsão e cimento. A mistura com adição de cimento obteve resultados um pouco maiores que as demais, mas cada mistura teve um comportamento quase que constante. Através da fluência é possível verificar a deformação total da mistura, parâmetro importante na análise da mistura como um todo. A Figura 39 mostra o ensaio sendo realizado para a obtenção da estabilidade e fluência na prensa Marshall.

Figura 39 – Ensaio na prensa Marshall.



4.6 Definição do Teor Ótimo de Projeto (TOP)

Com a análise dos gráficos de volume de vazios, estabilidade, fluência e massa específica máxima obtiveram-se os teores ótimos para cada mistura. Quando é definido o TOP para CBUQ, usualmente é levado em consideração o volume de vazios e a relação betume-vazios (RBV) para que se enquadre dentro das especificações de determinada faixa, além de se buscar uma mistura com boa densidade aliada à boa estabilidade e fluência. Nesta pesquisa a dificuldade foi maior, pois não existem normas para projetos de misturas recicladas. Existem algumas orientações quanto à resistência à compressão, umidade ótima para a mistura e compactação e procedimentos executivos. Os resultados obtidos são referências às amostras do estudo, sendo que certamente serão encontrados outros resultados para estes mesmos parâmetros. Os TOP's desta pesquisa foram definidos com base nas seguintes considerações:

a) Mistura com adição de emulsão: teor de 3% tendo baixo volume de vazios e para a densidade, estabilidade e fluência valores intermediários.

b) Mistura com adição de cimento: teor de 3,5% tendo menor volume de vazios, maior densidade, estabilidade e fluência intermediária crescente.

c) Mistura com adição de emulsão e cimento: teores de 3% de emulsão e 3,5% de cimento tendo baixo volume de vazios, maior densidade, estabilidade e fluência intermediária crescente. Nesta mistura foi definido o teor de cimento, uma vez que o teor de emulsão foi adotado o TOP da adição simples.

A opção por TOP's intermediários foi conservador em virtude de que no campo a execução pode ter variações, para mais ou para menos, nestes teores, sendo que em várias obras são admitidos em torno de 0,5% esta variação.

4.7 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos para a resistência à tração (RT) das misturas correspondem à média de três ensaios realizados, na condição seca. O resultado de RT para as misturas com adição de emulsão foi muito baixo, porém é justificável, pois a emulsão estabilizada não tem objetivo de dar resistência à tração para a mistura e sim contribuir para um melhor preenchimento entre os elementos e impermeabilizar a mistura. Nas misturas com adição de cimento houve o incremento, em função do seu potencial para agregar resistência, enquanto que na mistura com adição combinada de emulsão e cimento obteve-se uma resistência intermediária.

As misturas do estudo apresentaram alguma heterogeneidade e em função disso as resistências também acabaram variando em torno de 15%, principalmente nas misturas com a adição de cimento onde foi observada uma variação maior em suas resistências.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de RT.

Tabela 7: Resultados de Resistência à Tração.

Mistura	Emulsão (%)	Cimento (%)	Resistência à Tração (MPa)
BASE RECICLADA + EMULSÃO	3,0	-	0,043
BASE RECICLADA + CIMENTO	-	3,5	0,463
BASE RECICLADA + EMULSÃO + CIMENTO	3,0	3,5	0,306

A Figura 40 mostra o ensaio de RT sendo realizado no laboratório.

Figura 40 - Ensaio de RT no laboratório.



4.8 Módulo de resiliência

Os resultados obtidos para o módulo de resiliência (MR) das misturas correspondem à média dos ensaios realizados para as três misturas do estudo. Para a mistura de referência e a mistura com adição simples de emulsão foi necessário realizar o ensaio triaxial, seguindo as recomendações da norma DNIT-ME 134/2010. Para as misturas com adição simples de cimento e adição combinada de emulsão e cimento foi realizado como previsto, ou seja, moldando corpos-de-prova e submetendo-os às cargas repetidas no plano diametral vertical. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 8: Resultados de Módulo de Resiliência.

Mistura	Emulsão (%)	Cimento (%)	Ensaio	Norma	MR (MPa)	MR/RT
BASE RECICLADA (referência)	-	-	Triaxial	DNIT 134/2010 - ME	326	
BASE RECICLADA + EMULSÃO	3,0	-	Triaxial	DNIT 134/2010 - ME	426	9.899
BASE RECICLADA + CIMENTO	-	3,5	Comp. Diametral	DNER-ME133/94	15.593	33.678
BASE RECICLADA + EMULSÃO + CIMENTO	3,0	3,5	Comp. Diametral	DNER-ME133/94	10.759	35.160

O MR para a mistura de referência foi o balizador para analisar os demais resultados. A mistura com adição simples de emulsão agregou coesão à mistura e proporcionou um bom

comportamento durante o ensaio, sendo que passou por todos os ciclos do ensaio triaxial. As misturas com adição simples de cimento e adição combinada de emulsão e cimento apresentaram fragilidade quando submetidas às cargas repetidas durante o ensaio de compressão diametral. Durante o ensaio foram aplicadas $1/3$ da RT de cada mistura e o alto módulo evidencia a baixa resiliência das misturas quando submetidas a estas cargas.

Pires (2014) em seu estudo obteve relações de MR/RT que foram diminuindo com o passar dos dias de cura. Foi observado que as reduções das relações MR/RT aos 7, 28 e 160 dias de cura, tiveram como principal fator o aumento da resistência à tração juntamente com o incremento do módulo de resiliência. Esta redução contribui diretamente no aumento de capacidade de absorção das energias de deformação.

Pires (2014) obteve resultados de módulo de resiliência similares a este estudo, porém num prazo maior de cura. Considerando os teores de cimento maiores utilizados e os resultados de RT e MR, é possível que a adição de cinza de casca de arroz possa ter contribuído para o melhor desempenho ao longo do tempo das misturas estudadas por Pires, pois aos 28 dias os resultados eram inferiores para RT e MR quando comparado a este estudo. Observa-se que aos 160 dias os resultados são superiores para RT e similares para MR quando comparados aos obtidos neste estudo.

Balbo (2006) cita que vias de tráfego pesado devem contemplar o emprego de bases com misturas asfálticas ou cimentadas, de elevada rigidez, com matriz homogênea e uniforme, e pouco propensa à fratura. Nas misturas recicladas não há uma homogeneidade e nem uniformidade na matriz em virtude do processo de trituração que ocorre e isso faz com que as misturas se tornem frágeis quando submetidas às tensões.

Guthrie (2006) apresenta em seus resultados que os percentuais de fresado e de cimento nas misturas têm influência nos resultados e que se precisa buscar o ponto intermediário. Os estudos mostraram que o percentual de fresado na mistura deve estar compreendido entre 50% e 75% e que o teor de cimento deve estar na faixa de 1%. Guthrie afirma ainda que teores de cimento menores que 1% não é suficiente para estabilizar a mistura, porém teores altos podem causar fissuras pela fragilidade.

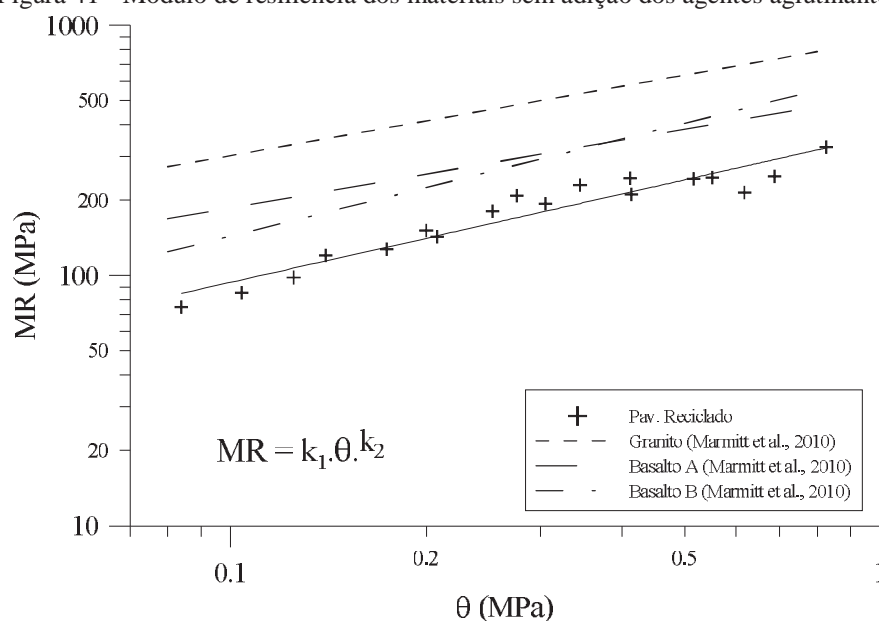
Trichês (2013) cita que dependendo dos teores empregados de cimento e também da relação do material triturado das camadas do revestimento e da base, a mistura reciclada apresentará diferente comportamento quanto à resistência, rigidez e trabalhabilidade. E esses fatores serão decisivos no desempenho da estrutura do pavimento reciclado.

Em ambos os trabalhos fica evidenciado que as dosagens devem ser as mínimas a fim de não fragilizar a estrutura da mistura como um todo.

Marmitt et al. (2010), que fez uma caracterização das propriedades resilientes em três tipos de agregados do sul do Brasil cita a importância deste conhecimento do comportamento destes materiais. Marmitt et al. (2010) analisou a influência da umidade e densidade no comportamento destes materiais. Em suas conclusões cita que a variação entre a umidade ótima e abaixo e acima pode interferir nos agregados de granito, sendo que aumentando a umidade o módulo de resiliência baixa. Considerando esta conclusão pode-se afirmar que o controle da umidade em campo das misturas deve ser verificado constantemente.

Comparando-se os dados de Marmitt no ensaio de módulo de resiliência com os resultados obtidos neste estudo, observa-se que ao aumentar as tensões de confinamento, a mistura deste estudo tem um comportamento similar ao do granito. A Figura 41 apresenta os diferentes níveis de confinamento aplicados às amostras.

Figura 41 - Módulo de resiliência dos materiais sem adição dos agentes aglutinantes



Este comportamento observado na Figura 41 para a mistura deste estudo pode estar associado ao fato de ocorrer um esmagamento dos grumos durante os ciclos de carga e descarga durante o ensaio de compressão, gerando uma densificação da mistura ao aumentar o nível de tensão aplicada.

Na Tabela 9 é evidenciado este fato quando se analisa os valores de k_2 , sendo que os coeficientes são maiores do que os encontrados nos demais materiais.

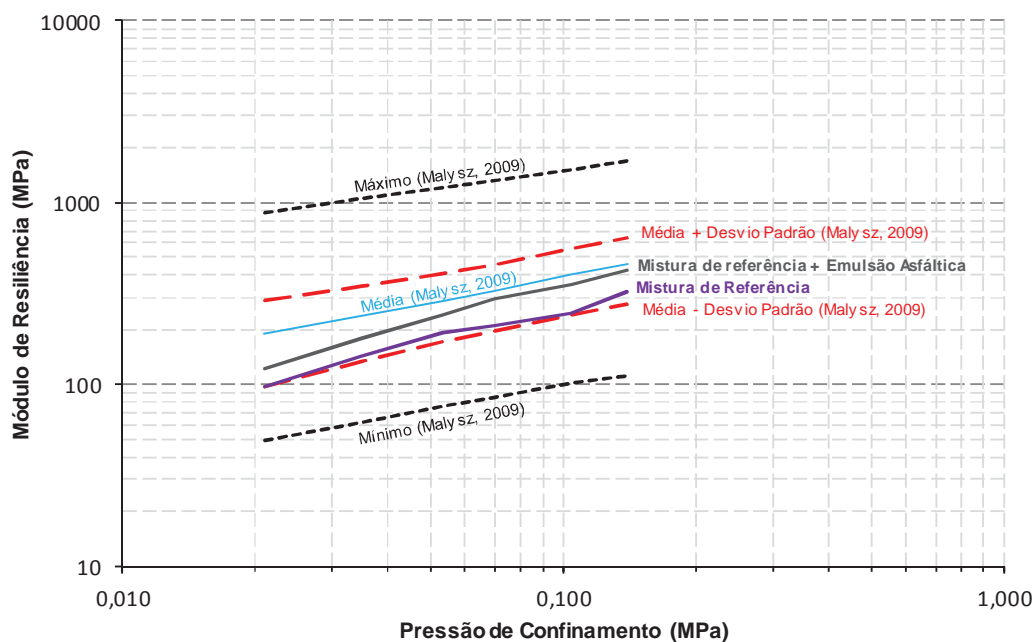
Tabela 9: Coeficientes obtidos a partir do modelo $MR = k1.0.k2$

Material	Coeficientes		Coeficiente de regressão (R ²)
	k1	k2	
Base Reciclada (referência)	362	0,59	0,92
Base Reciclada (referência) + Emulsão	522	0,64	0,96
Granito *	870	0,46	
Basalto 01 *	525	0,45	0,7 – 1
Basalto 02 *	635	0,64	

* Valores médios obtidos a partir de Marmitt et al. (2010)

Malysz (2009) revisou resultados de ensaios de módulo de resiliência de agregados provenientes de diversas regiões do Brasil. Esta revisão contemplou resultados experimentais, análises e conclusões de diversas dissertações de mestrado e teses de doutorado sobre o assunto, contemplando mais de 600 (seiscentas) amostras. Esta revisão gerou um estatístico dos módulos de resiliência de agregados brasileiros e nele foram inseridos os resultados obtidos neste estudo para a mistura de referência e mistura de referência com adição de emulsão asfáltica. Na Figura 42 são apresentados os resultados comparativos.

Figura 42 - Módulos de resiliência comparativo de agregados brasileiros e do estudo.



Analisando a distribuição das misturas deste estudo com os parâmetros encontrados por Malysz (2009), observa-se que a mistura de referência tem um comportamento similar e acima da média menos o desvio padrão, enquanto que a mistura de referência com adição da emulsão asfáltica apresenta uma distribuição abaixo da média, porém com um comportamento superior quando submetida ao aumento de tensões de confinamento. Este comparativo evidencia que as misturas recicladas deste estudo se enquadram dentro dos parâmetros encontrados por Malysz (2009) e assim aumenta a confiabilidade nos resultados obtidos.

Na tabela 11 temos os parâmetros para a obtenção do módulo de resiliência e a partir deles podemos observar que k_2 justifica o comportamento crescente das misturas recicladas quando comparamos com os resultados dos agregados brasileiros. Esta condição de comportamento superior pode estar relacionada ao acréscimo do revestimento betuminoso triturado na mistura de referência e a adição da emulsão na mistura de referência com adição de emulsão asfáltica, que durante o aumento das tensões de confinamento propicia uma mistura com mais densificada.

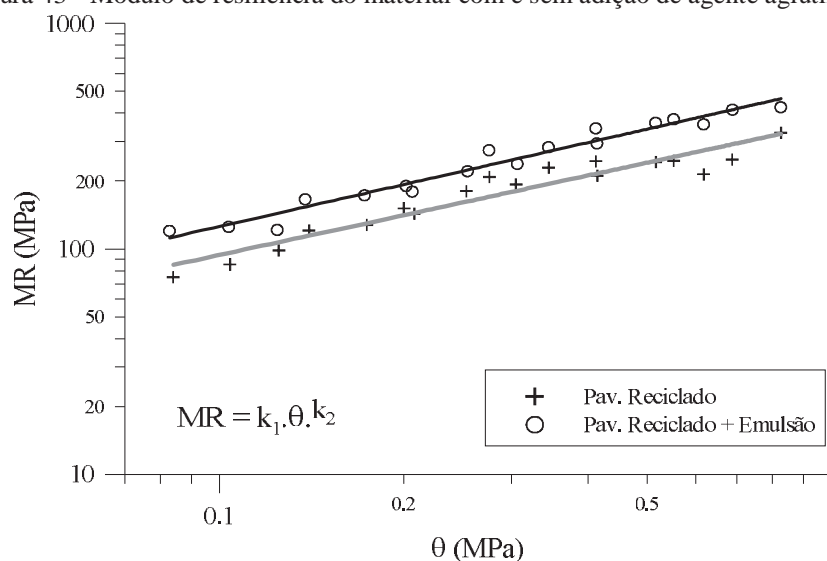
Tabela 11: Módulos de resiliência comparativo de agregados brasileiros e do estudo.

Curva	k1	k2	Pressão de confinamento (MPa)						
			0,021	0,035	0,053	0,070	0,104	0,140	
Módulos de resiliência (MPa)									
Média	1133	0,46	191	239	289	329	399	460	
Desvio padrão	0	0,00	94	105	118	131	158	185	
Média + desv. pad.	1469	0,43	286	344	407	460	558	645	
Média - desv. pad.	828	0,55	97	134	170	198	241	274	
Máxima	3264	0,34	888	1055	1213	1332	1527	1683	
Mínima	267	0,44	49	62	75	84	101	111	
Mistura de Referência	362	0,59	98	142	192	210	245	326	
Mistura de Ref. + Emulsão Asfáltica	522	0,64	122	180	239	294	357	426	

Na Figura 43 são apresentados os resultados para as mistura com adição de emulsão para reciclagem e sem adição.

Analisando o comportamento ao longo da aplicação das diferentes tensões de confinamento observa-se que a mistura com adição de emulsão obteve um incremento no módulo de resiliência e conseqüentemente uma melhora em suas propriedades mecânicas ao aumentar tais tensões. Este comportamento na mistura com adição de emulsão para reciclagem tem possível contribuição no desempenho das deformações permanentes.

Figura 43 - Módulo de resiliência do material com e sem adição de agente aglutinante



4.9 Resultados do programa EVERSTRESS 5.0

Os resultados foram obtidos a partir de uma estrutura modelo (projeto) com espessura total de 0,35m, sendo:

- revestimento com $e=0,05m$;
- base com $e=0,15m$;
- sub-base com $e=0,15m$; e,
- subleito

A partir desta estrutura modelo foram geradas simulações com a inserção da base reciclada, ficando a nova estrutura com 0,40m, sendo:

- revestimento com $e=0,05m$;
- base reciclada com $e=0,15m$;
- base com $e=0,05m$ (residual da camada antiga);
- sub-base com $e=0,15m$; e,
- subleito

A estrutura nova acresce em 0,05m devido a incorporação do revestimento antigo na base reciclada. Assim a aplicação da nova camada de revestimento ($e=0,05m$) acresce em espessura.

Os cálculos são obtidos com base nas microdeformações de tração na fibra inferior do revestimento. Aplicando estas microdeformações na equação de fadiga proposta, temos o número “N” admissível para as estruturas em estudo.

A condição é de que as novas estruturas satisfaçam a estrutura modelo, que aqui é representado por N_{proj} .

4.9.1 Resultados para ESRD de 8,2tf

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos na simulação para um Eixo Simples de Roda Dupla (ESRD) de 8,2tf.

Tabela 11: Resultados para ESRD de 8,2tf.

CURVA DE FADIGA	Misturas				
	Projeto	Referência	Cimento	Emulsão	Emulsão + Cimento
Salomão Pinto (USACE)					
espessura do revest. (cm) =	5	5	5	5	5
ϵ_t = microdeformação	325,41E-06	181,33E-06	-045,39E-06	136,36E-06	-051,56E-06
f_0 = σ 10^5	100000	100000	100000	100000	100000
nível da fibra	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
L3 - X=	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
N_{adm} =	2,29E+06	1,08E+07	*	2,31E+07	*
N_{proj} =	2,29E+06	2,29E+06	2,29E+06	2,29E+06	2,29E+06
$N_{adm} \geq N_{proj}$	OK	OK		OK	

* Não foi possível encontrar o número "N".

Pela tabela pode-se verificar que a estrutura modelo ou o projeto teria um $N_{proj}=N_{adm}=2,29 \times 10^6$. Analisando as demais misturas temos que:

- Base Reciclada de Referência: se a opção fosse apenas reciclar o pavimento sem adição alguma teríamos um $N_{adm}=1,08 \times 10^7$. Este incremento se deve ao processo de incorporar o revestimento betuminoso na base existente;

- Base Reciclada com adição de Emulsão: reciclando o pavimento e adicionando a emulsão teríamos um $N_{adm}=2,31 \times 10^7$. A emulsão dá coesão e possibilita um incremento significativo na estrutura juntamente com a incorporação do revestimento betuminoso;

- Base Reciclada com adição de Cimento: Não foi possível encontrar o N_{adm} , pois o alto MR faz com que na simulação as microdeformações fiquem negativas. Quando as microdeformações se apresentam negativas a análise é de compressão na fibra inferior e não de tração;

- Base reciclada com adição de Emulsão e Cimento: Também não foi possível encontrar o N_{adm} , pois o alto MR faz com que na simulação as microdeformações fiquem negativas e estas devem ser analisadas como compressão nas fibras inferiores e não como tração;

Esta primeira análise é considerando o eixo padrão adotado no Brasil de 8,2tf para dimensionamento de pavimentos flexíveis. Os altos módulos obtidos para as misturas com adição simples de cimento e adição combinada de emulsão e cimento tem fundamentação na presença de cimento, que agrega o enrijecimento das misturas.

4.9.2 Resultados para ESRD de 10tf

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos na simulação para um Eixo Simples de Roda Dupla (ESRD) de 10tf.

Tabela 12: Resultados para ESRD de 10tf.

CURVA DE FADIGA	Misturas				
	Projeto	Referência	Cimento	Emulsão	Emulsão + Cimento
Salomão Pinto (USACE)					
espessura do revest. (cm) =	5	5	5	5	5
ε_r = microdeformação	400,77E-06	223,32E-06	-055,90E-06	167,98E-06	-063,50E-06
f_0 = 10^5	100000	100000	100000	100000	100000
nível da fibra	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
L3 - X=	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
N_{adm} =	1,32E+06	6,23E+06	*	1,33E+07	*
N_{proj} =	1,32E+06	1,32E+06	1,32E+06	1,32E+06	1,32E+06
$N_{adm} \geq N_{proj}$	OK	OK		OK	

* Não foi possível encontrar o número "N".

Pela tabela pode-se verificar que a estrutura modelo ou o projeto teria um $N_{proj}=N_{adm}=1,32 \times 10^6$. Analisando as demais misturas temos que:

- Base Reciclada de Referência: se a opção fosse apenas reciclar o pavimento sem adição alguma teríamos um $N_{adm}= 6,23 \times 10^6$. Este pequeno incremento se deve ao processo de incorporação do revestimento na base existente;

- Base Reciclada com adição de Emulsão: reciclando o pavimento e adicionando a emulsão teríamos um $N_{adm}= 1,33 \times 10^7$. A emulsão dá coesão e possibilita um incremento significativo na estrutura;

- Base Reciclada com adição de Cimento: Não foi possível encontrar o N_{adm} , pois o alto MR faz com que na simulação as microdeformações fiquem negativas, passando então para uma análise de compressão na fibra inferior e não de tração;

- Base reciclada com adição de Emulsão e Cimento: Também não foi possível encontrar o N_{adm} , pois o alto MR faz com que na simulação as microdeformações fiquem negativas, passando então para uma análise de compressão na fibra inferior e não de tração;

Nesta análise é possível também identificar o quanto as sobrecargas reduzem a vida útil de um projeto, pois aceleram o processo de deterioração do pavimento.

4.10 Análise dos resultados

O objetivo geral desta pesquisa foi apresentar um estudo do comportamento mecânico de pavimentos flexíveis reciclados com adição de diferentes agentes estabilizadores. Neste trabalho foi proposto utilizar o método Marshall (para misturas betuminosas a frio) para o projeto de mistura reciclada, diferente do que os projetistas utilizam normalmente que é pelo método do Proctor. Os parâmetros obtidos para o volume de vazios, densidade máxima aparente, estabilidade e fluência geraram gráficos que permitiram a compreensão do comportamento das misturas durante a adição ou da subtração do percentual de agente estabilizante e assim, foi possível definir o teor ótimo de projeto de cada mistura reciclada.

Assim, é possível chegar ao final deste trabalho observando os seguintes aspectos:

- A mistura com adição simples de emulsão obteve $RT = 0,043$ MPa. Este valor é muito baixo, porém perfeitamente compreensível quando temos que a emulsão tem propriedades para melhorar a coesão e atuar como um agente impermeabilizante na mistura reciclada, e não para dar resistência;
- A mistura com adição simples de cimento obteve $RT = 0,463$ MPa. Considerando que foi adicionado 3,5% de cimento Portland, a RT poderia ter apresentado um valor maior. Uma das possíveis causas pode ter sido o RAP (pavimento asfáltico reciclado) que não se envolveu na mistura tão bem quanto se envolveria se fosse adicionado um agente estabilizante betuminoso;
- A mistura com adição combinada de emulsão e cimento obteve $RT = 0,306$ MPa. O resultado um pouco abaixo em relação à mistura com adição simples de cimento evidencia que as misturas que possuem adição de cimento devem manter a RT nesta média. Como a emulsão utilizada não tem característica de agregar resistência, como podemos observar em emulsões do tipo RM, RL e ARE, o resultado se manteve próximo da mistura com adição simples de cimento. Uma das possíveis causas da pequena redução da RT pode ter sido também o complemento do TOF com emulsão e não com água apenas como foi feito na mistura com adição simples de cimento.

- De uma forma geral observou-se que a mistura com adição simples de cimento Portland incrementou cerca de dez vezes a resistência obtida na mistura com adição simples de emulsão.

- A mistura de referência obteve $MR = 326$ MPa. O resultado foi obtido através do ensaio triaxial e apresentou um bom comportamento durante o ensaio. O MR foi superior ao de uma base de brita graduada que tem $MR = 200$ MPa em média, e este incremento está relacionado com a composição desta nova mistura que contém além dos agregados, parte do revestimento betuminoso triturado;

- A mistura com adição simples de emulsão obteve $MR = 426$ MPa. A mistura teve um bom comportamento durante o ensaio triaxial concluindo todos os ciclos previstos. A mistura apresentou um aumento relativo no módulo, quando comparado com bases de brita graduada e com a mistura de referência, com a contribuição da emulsão, que proporcionou maior coesão na mistura reciclada;

- A mistura com adição simples de cimento obteve $MR = 15.593$ MPa. O resultado foi obtido através da compressão diametral e foi observado que este alto módulo de resiliência foi obtido aplicando-se uma carga pequena, em torno de $1/3$ da RT obtida. Essa relação de pequena carga aplicada e o alto MR resultante evidencia a fragilidade que a mistura possui. Este aspecto pode na prática comprometer a base reciclada refletindo e propagando as fissuras rapidamente para o novo revestimento betuminoso;

- A mistura com adição combinada de emulsão e cimento obteve $MR = 10.759$ MPa. O valor foi obtido através da compressão diametral nas mesmas condições da mistura com adição simples de cimento. Embora a emulsão tenha contribuído para a redução do alto MR da mistura combinada, ela não agregou elasticidade à mistura, o que na prática também poderá comprometer uma nova estrutura composta por base reciclada através da propagação de fissuras para o revestimento betuminoso.

Outro objetivo específico da pesquisa foi de se realizar o dimensionamento mecânico de pavimentos considerando o pavimento reciclado e estabilizado como camada granular e comparar com estruturas convencionais.

Nas simulações feitas utilizando o Everstress 5.0 para ESRD de 8,2tf temos que:

- Para as misturas com adição simples de cimento e adição combinada de emulsão e cimento não foi possível se obter o número “N” através da equação da curva de fadiga, pois as microdeformações indicaram compressão nas fibras inferiores. A curva adotada simula estruturas flexíveis e não semirrígidas ou invertidas;

- Para a mistura com adição simples de emulsão observou-se um acréscimo no número “N” de 12,3 milhões de passagens em relação à mistura de referência e de 20,81 milhões de passagens quando comparado ao projeto proposto na pesquisa.

Nas simulações feitas utilizando o Everstress 5.0 para ESRD de 10tf tem-se que:

- Para as misturas com adição simples de cimento e adição combinada de emulsão e cimento também não foi possível se obter o número “N” através da equação da curva de fadiga, pois as microdeformações se apresentaram negativas, o que indica compressão nas fibras e não tração. A curva adotada simula estruturas flexíveis e não semirrígidas ou invertidas;

- Para a mistura com adição simples de emulsão observou-se um acréscimo no número “N” de 7,07 milhões de passagens em relação à mistura de referência e de 11,98 milhões de passagens quando comparado ao projeto proposto na pesquisa. A sobrecarga aplicada ao mesmo projeto evidencia a redução de vida útil de um pavimento.

Segundo Lovato (2004), as camadas cimentadas desenvolvem micro-fissuras logo após sua construção devido ao alto módulo de resiliência. Esta camada permanece intacta deve apresentar uma resistência a compressão simples muito elevada, porém a resistência à tração deve ser avaliada, pois rompe à tração. Neste estudo as misturas cimentadas apresentaram compressão nas fibras inferiores e devem ser avaliadas quanto a possível ruptura por tração.

De uma forma geral, é importante citar que o software faz a análise da estrutura como um todo sendo homogêneo e estamos analisando uma estrutura flexível com uma camada semi-rígida ou rígida nesta estrutura, e os resultados podem ser mais satisfatórios com o uso de um programa como o “Pavimentos Asfálticos” que foi desenvolvido pelo Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LMP-EPUSP) para o DER/SP. Neste programa é possível fazer a verificação de fadiga para pavimentos flexíveis, semirrígidos e invertidos diretamente.

5 CONCLUSÕES FINAIS

A partir dos resultados observados ao longo deste estudo foi possível chegar as seguintes conclusões:

- A RT das misturas com adição simples de cimento e com adição combinada de emulsão e cimento obtiveram resultados baixos considerando o teor de cimento adicionado nas duas misturas. A emulsão, o revestimento betuminoso incorporado na mistura e a granulometria da mistura podem ser os possíveis causadores da redução da RT;

- A RT da mistura com adição simples de emulsão para reciclagem foi praticamente nula. O fato da emulsão não ter propriedade de dar resistência à mistura pode estar relacionado com a baixa RT. Porém esta mistura obteve um bom comportamento durante o ensaio de compressão confinada. A emulsão condicionou melhora nas propriedades da mistura, dando-lhe melhor coesão;

- As misturas com adição simples de cimento e com adição combinada de emulsão e cimento apresentaram um alto MR. Na prática, essas estruturas são frágeis e propagarão suas trincas e fissuras para o revestimento betuminoso, caso não se considere um pavimento invertido e se previna essa patologia. Contudo, é necessário mais estudos do comportamento a fadiga destas misturas com o intuito de avaliar o potencial de formação de trincas;

- A mistura com adição simples de emulsão mostrou melhor desempenho durante o ensaio triaxial e o seu MR foi superior cerca de duas vezes quando comparado com a base existente;

- A análise computacional para ESRD de 8,2tf e ESRD de 10tf, além de auxiliar na visualização do comportamento das diferentes estruturas, confirmou os efeitos causados pela ação das sobrecargas, neste caso representado pelo ESRD de 10tf;

- Se a concepção do projeto de reciclagem for de aproveitar os materiais e manter uma estrutura flexível, a escolha mais adequada é a mistura com adição simples de emulsão. A emulsão possibilita rejuvenescer e impermeabilizar a camada deteriorada da base, melhora a coesão e ainda agrega uma melhora de capacidade na estrutura em relação ao pavimento existente;

- Por outro lado, se a concepção do projeto for de buscar o aproveitamento dos materiais e proporcionar uma nova capacidade para a estrutura considerando-o um pavimento invertido em seu novo dimensionamento, certamente a escolha deve ser pelas misturas com adição simples de cimento ou com adição combinada de emulsão e cimento;

- Conclui-se ainda que, é necessário aprofundar o estudo do comportamento das misturas para outros agentes e a partir daí determinar as especificações para misturas recicladas.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sabendo-se que a técnica de reciclagem dos pavimentos flexíveis tende a ser a grande realidade em nossas rodovias, segue algumas sugestões de trabalhos futuros com base nesta pesquisa:

- Realizar a análise mecânica utilizando o Programa Pavimentos, SISPAV ou outro similar que possibilite a verificação de pavimentos flexíveis, semirrígidos e invertidos;
- Desenvolver curva de vida de fadiga que contemplem estruturas semirrígidas ou invertidas;
- Pesquisar a adição de outros agentes nas misturas recicladas como a cal, emulsões asfálticas e outros aditivos químicos;
- Pesquisar a compatibilidade química dos agentes estabilizadores com a mistura reciclada para melhorar a compreensão do comportamento das misturas finais;
- Realizar uma análise relacionada ao custo de ciclo de vida de obras que possam receber este tipo de reparo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, AASHTO. **Guide for design of pavement structures**. Washington, DC. 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM, **ASTM-D2041: Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures**. EUA, 2000.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. ARRA, **Basic asphalt recycling manual**. EUA, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, **NBR 7175: Cal hidratada para argamassas - Requisitos**. Rio de Janeiro: 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, **NBR 11579/91: Cimento Portland – determinação da finura por meio da peneira nº 200**. Rio de Janeiro: 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, **NBR 16018/2011: Misturas Asfálticas - Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida**. Rio de Janeiro: 2011.

BALBO, J. T., **Britas Graduadas Tratadas com Cimento – Uma Avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2006.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, 2008. Petrobrás: ABEDA. 504p.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. São Paulo, 2001. Ed. Fazendo Arte. 111p.

BROWN BROWN BRASIL, **Reciclagem “in situ”**. Disponível em http://www.brownbrown.com.br/site/?page_id=67 Acesso em 03 nov. 2012.

CASTRO, L. N. **Reciclagem a frio “in situ” com espuma de asfalto**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, 2003.

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

DAMA, M. A., **Análise de comportamento da camada reciclada com espuma de asfalto na rodovia BR-290/RS**. 2003. 181f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DAVID, D. **Misturas asfálticas recicladas a frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Grande do Sul – Porto Alegre, 2006.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA. DEINFRA, **Consulta pública discute projeto de reabilitação com aumento de capacidade da rodovia SC-135** Disponível em: <http://www.deinfra.sc.gov.br/jsp/noticias>. Acesso em 03 nov. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER, **Pavimentação – base estabilizada granulometricamente – DNER-ES 141/2010**. Rio de Janeiro, 2010. 9p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER, **Especificação de Material – DNER-EM 369/97**. Rio de Janeiro, 1997. 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER, **Agregados - análise granulométrica – DNER-ME 083/98**. Rio de Janeiro, 1998.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER, **Mistura Betuminosa a frio com emulsão asfáltica – Determinação da densidade aparente – DNER-ME 117/94**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER, **Misturas Betuminosas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral – DNER-ME 138/94**. Rio de Janeiro, 1994.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER, **Misturas Betuminosas a quente – Ensaio Marshall – DNER-ME 043/95**. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT, **Determinação do módulo de resiliência – DNIT 134/2010 - ME**. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT, **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006. 310p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT, **Manual de pavimentação**. Disponível em [http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual de Pavimentação Versao Final.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentação_Versao_Final.pdf) Acesso em 03 nov. 2012.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. FHWA. **Final Report. Use of reclaimed asphalt pavement (RAP) Under Superpave Specifications**. EUA, 2002.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. FHWA. **Techniques for pavement rehabilitation**. EUA, 1997.

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](http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf)
Acesso em 12 nov. 2012

GUTHRIE, W. S., BROWN, A. V., EGGETT, D. L., **Cement Stabilization of Aggregate Base Material Blended with Reclaimed Asphalt Pavement**. Paper 428. Brigham Young University. Utah, Estados Unidos. 2006.

JORGE, F. S. **Redimensionamento da duplicação da BR-101/SC lote 28 e avaliação do impacto financeiro**. 2008. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC – Criciúma, 2008.

LOVATO, R. S., **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. 2004. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MAHLER, C. F., MOTTA, L. M. G. (1982). **Comentários sobre a aplicação do método dos elementos finitos à análise de pavimentos**. 17ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPV, Brasília, 1:289 – 310.

MALYSZ, R. **Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos**. 2009. 350f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARMITT et al., **Caracterização de propriedades resilientes de três britas graduadas utilizadas em pavimentos no sul do Brasil**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n 15, p.63-69, abril, 2010.

MEDINA, J. **Fundamentos de mecânica dos pavimentos**. 1998. Tese (Concurso de Professor Titular) – Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro, 1998.

MERIGHI, J. V., FORTES, R. M., **Estudo do aumento da resistência mecânica em função do tempo nas misturas de reciclagem com cimento Portland**. In: 4ª Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos. Porto, 2005

MOMM, L., **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) – São Paulo, 1998.

MOMM, L., DOMINGUES, F. A. A., **“Reciclagem de Pavimentos à frio “in situ” superficial e profunda”**. In: *Reunião Anual da Pavimentação, 29a*, Cuibá, 1995.

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

NETO, R. S. B., **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos**

para a região de Campo Grande/MS. 2004. 189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PINTO, S., PREUSSLER, E., **Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** Rio de Janeiro: Copiarte, 2002. 269p.

PIRES, G. M., **Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos.** 2014. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

REVISA, **Tecnologia em Pavimentos.** Disponível em <http://www.revisa-sa.com.br> Acesso em 03 nov. 2012.

ROGGE, D. F. et al., **“Use of asphalt emulsions in-place recycling: Oregon Experience”.** In: *Transportation Research Record*, 1993.

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

SANTOS, J. M. R., **Materiais utilizados na construção de pavimentos rodoviários.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro – Aveiro - Portugal, 2010.

SEVERI, A. A. et al., **Verificação à Fadiga de Revestimentos Asfálticos e Bases Cimentadas - “Programa Pavimentos Asfálticos v. 1.0”.** In: 3º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço. Belém, 1999

SILVA, A. H. M., **Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, 2011.

TAHA, R. et al., Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases. **TRB - Transportation Research Board**, Washington, v. 1652/1999, p. 264-269, jan. 2007.

TRICHÊS, G., SANTOS, A., **Avaliação do desempenho da reciclagem do pavimento da rodovia SC-303.** In: 7º Congresso Brasileiro de Rodovias & Concessões. Foz do Iguaçu, 2011

TRICHÊS, G., et al., **Caracterização do Comportamento Mecânico de Misturas Recicladas com Adição de Cimento.** 42ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPV, Gramado, 2013.

VALE, C., MELO, A. S., **Análise do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis: os modelos materiais das misturas betuminosas.** In: 5ª Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias. Recife, 2006.

VOTORANTIM CIMENTOS, **Produtos: Cimento.** Disponível Em <http://www.vcimentos.com.br/htms-ptb/Produtos/Cimento.htm>. Acesso em 21 jun. 2013.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. WSDOT, **Everseries Software Program**, 2005. Disponível em <http://www.pavementinteractive.org/article/a-mechanistic-computer-program> Acesso em 12 nov. 2012.

WESSELING, D. H. **Avaliação laboratorial do comportamento de misturas em concreto asfáltico**. 2002. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Ijuí, 2002.

WIRTGEN GROUP. **Cold Recycler WR 2500 SK.** Disponível em http://www.wirtgen.de/en/produkte/kaltrecycler/wr_2500sk /WR2500SK k Produktseite.php Acesso em 03 nov. 2012.

WIRTGEN GROUP. **Colder Recycler: Wirtgen Cold Recycling Technolgy.** Disponível em http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf/dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/ allgemein_1/manual/p_manual_e.pdf. Acesso em 21 jun. 2013.

YODER, E. J., WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. John Willey & Sons. 2. Ed. New York, 1975.