

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A FRIO DO TIPO
*GRAVE-ÉMULSION***

Júlio César Balbinot

Porto Alegre

Dezembro de 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

JÚLIO CÉSAR BALBINOT

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A FRIO DO TIPO
*GRAVE-ÉMULSION***

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

Porto Alegre

Dezembro 2007

JÚLIO CÉSAR BALBINOT

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A FRIO DO TIPO
*GRAVE-ÉMULSION***

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

Porto Alegre, 03 de dezembro de 2007

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
D.Sc. pela COPPE – UFRJ
Orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adriano Virgílio Damiani Bica (UFRGS)
PhD pela University of Surrey, Reino Unido

Prof. Luciano Pivoto Specht (UNIJUI)
D.Sc. pela UFRGS

Prof.^a Suyen Matsumura Nakahara (UFRGS)
D.Sc. pela USP

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
D.Sc. pela UFRGS

B172e Balbinot, Júlio César
Estudo de misturas asfálticas a frio do tipo Grave-Émulsion / Júlio César Balbinot.
– 2007.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2007.

Orientação: Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti

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

CDU-625.8(043)

Dedico este trabalho aos meus pais Nelson e Eunice, a minha irmã Natália e a minha namorada Cristiane.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Jorge Augusto Pereira Ceratti pela orientação durante a elaboração deste trabalho.

À Professora Suyen Matsumura Nakahara pela amizade, incentivo e inestimável colaboração.

Ao Professor Washington Peres Núñez pela atenção e auxílio na tentativa de contato com pesquisadores franceses e pela disponibilidade de valioso material bibliográfico.

Ao Professor Fernando Pugliero Gonçalves pelos ensinamentos e motivação que muito contribuíram na minha formação acadêmica.

A Empresa Eldorado Mineração pelo fornecimento dos agregados, em especial ao engenheiro Manozzo e ao laboratorista Seu Edimar, sempre atenciosos para qualquer esclarecimento.

A Ipiranga Asfaltos pelo fornecimento da emulsão asfáltica, em especial ao engenheiro químico Êmerson do CDT de Paulínia.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, seus professores, sua coordenação e quadro de funcionários, pela oportunidade, dedicação e aprimoramento científico e educacional.

A engenheira Luciana Rohde e aos doutorandos Álvaro Pereira, Klaus Theisen, Rodrigo Malysz e Danielle Clermann sempre prestativos para esclarecer qualquer dúvida.

A todos os colegas do LAPAV em especial Seu Ivo, Vinícius Alves, Andreas Ostermann, Vinícius Barp, Daniel Fernandes, Diego Treichel e André Jr. por toda a ajuda na realização deste trabalho e pela amizade.

Aos amigos e colegas desde a época da faculdade em Passo Fundo e colegas de mestrado Anderson Fonini, Andrios Jacaré Andrade, José Rojas, Leonardo Behak, Luizmar Lopes Júnior e Marcelo Hansen pelo grande companheirismo e amizade.

À minha namorada Cristiane pelo amor, carinho, compreensão, incentivo e muita paciência durante este trabalho.

De forma especial e carinhosa agradeço aos meus pais Nelson e Eunice pelo amor, apoio, incentivo e por sempre estarem do meu lado.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	xvi
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1 CAPÍTULO 1.....	20
INTRODUÇÃO	20
1.1 Considerações iniciais	20
1.2 Objetivo	23
1.3 Objetivos específicos	23
1.4 Organização da dissertação	23
2 CAPÍTULO 2.....	25
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Agregados	25
2.2 Emulsão asfáltica	28
2.3 Água	32
2.4 Misturas Asfálticas a Frio.....	34
2.4.1 Particularidades do comportamento	39
2.4.2 Processo de Cura	42
2.4.3 Cura antes da compactação	42
2.4.4 Cura após a compactação	44
2.5 Misturas asfálticas tipo <i>grave-émulsion</i>	46
2.5.1 Classificação	48
2.5.2 Emprego das misturas tipo <i>grave-émulsion</i>	49
2.5.3 Principais Vantagens	50
2.5.4 Principais Desvantagens	51
2.5.5 Comportamento das misturas tipo <i>grave-émulsion</i>	52

3	CAPÍTULO 3.....	61
	MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
3.1	Agregados.....	61
3.2	Emulsão asfáltica.....	63
3.3	Misturas asfálticas tipo <i>grave-émulsion</i>	63
3.3.1	Escolha das curvas granulométricas.....	63
3.3.2	Teor de emulsão asfáltica.....	67
3.3.3	Teor da água de molhagem.....	68
3.3.4	Determinação da umidade de compactação.....	68
3.3.5	Moldagem dos corpos-de-prova.....	71
3.3.6	Preparação das misturas.....	71
3.3.7	Processo de cura antes da compactação.....	72
3.3.8	Processo de cura pós compactação.....	73
3.3.9	Umidade das misturas.....	74
3.3.10	Estocagem das misturas.....	74
3.4	Ensaio realizados nas misturas tipo <i>grave-émulsion</i>	76
3.4.1	Estabilidade e fluência Marshall.....	77
3.4.2	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	77
3.4.3	Ensaio de Módulo de Resiliência por compressão diametral.....	79
3.4.4	Ensaio de fluência por compressão axial dinâmico (<i>creep</i> dinâmico).....	83
3.4.5	Ensaio Cantabro.....	86
4	CAPÍTULO 4.....	88
	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	88
4.1	Curvas Granulométricas.....	88
4.2	Emulsão asfáltica.....	90
4.3	Massas Específicas.....	90
4.4	Propriedades Volumétricas (volume de vazios, vazios no agregado mineral e relação betume-vazios).....	92
4.5	Estabilidade e Fluência.....	95
4.6	Resistência à Tração.....	97
4.7	Módulo de Resiliência.....	101
4.8	Determinação da deformação permanente (<i>creep</i> dinâmico).....	104
4.9	Determinação do ensaio Cantabro.....	106

5	CAPÍTULO 5.....	108
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108
5.1	Conclusões.....	108
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distribuição da malha rodoviária brasileira (CNT, 2007).	21
Figura 2.1 – Fases sistemáticas da ruptura das emulsões asfálticas (Adaptado de Serfass, 2002).	30
Figura 2.2 – Representação esquemática de diferentes tipos de misturas a frio com emulsão (SERFASS, 2002).	39
Figura 2.3 – Distribuição dos vazios de uma mistura asfáltica a quente (Adaptado de SERFASS, 2002).	41
Figura 2.4 – Distribuição dos vazios de uma mistura asfáltica a frio (Adaptado de SERFASS, 2002).	41
Figura 2.5 – Etapas de execução dos serviços nas primeiras experiências com <i>grave-émulsion</i> (Carvalho Filho e Bordes, 2003).	47
Figura 2.6 – Reperfilagem com <i>grave-émulsion</i> . (Adaptado de Chaignon, 1990).	49
Figura 2.7 – Evolução do teor de água residual em função do tempo de maturação (Adaptado de ECKMANN <i>et al.</i> , 2002).	52
Figura 2.8 – Resistência a compressão em função da quantidade de água evaporada (Adaptado de ECKMANN <i>et al.</i> , 2002).	53
Figura 2.9 – Evolução da resistência à compressão e da quantidade de água evaporada em função do tempo de maturação (Adaptado de POIRIER <i>et al.</i> , 2002a).	54
Figura 2.10 – Evolução da perda de água em amostras Duriez em função do tempo de cura (Adaptado de POIRIER <i>et al.</i> , 2002a).	55
Figura 2.11 – Evolução da perda de água em amostras <i>Gyropac</i> . (Adaptado de POIRIER <i>et al.</i> , 2002a).	56
Figura 2.12 – Influência do teor de água sobre o módulo resiliente (Adaptado de POIRIER <i>et al.</i> , 2002a).	56
Figura 2.13 Evolução do ATR com diferentes tempos de cura (Adaptado de BENSE <i>et al.</i> , 2002).	57
Figura 2.14 Comparativo da evolução do ATR entre <i>grave-émulsion</i> e <i>grave bitume</i> (Adaptado de BENSE <i>et al.</i> , 2002).	58

Figura 3.1 – Curvas granulométricas dos agregados empregados.....	62
Figura 3.2 – Curvas granulométricas GE 0/10 Adaptada, de referência e faixa E do DER/PR – ES-P 23/05.....	66
Figura 3.3– Curvas granulométricas GE 0/10 NF, de referência e faixa E do DER/PR – ES-P 23/05.....	66
Figura 3.4 – Curvas granulométricas GE 0/14 Adaptada, de referência e faixa E do DER/PR – ES-P 23/05.....	67
Figura 3.5 – Curvas granulométricas GE 0/14 NF, de referência e faixa E do DER/PR – ES-P 23/05.....	67
Figura 3.6 – Resistência a tração em função do percentual da umidade total.....	69
Figura 3.7 – Volume de vazios em função do percentual da umidade total.....	69
Figura 3.8 – Massa específica aparente em função do percentual da umidade total.....	70
Figura 3.9 – Estabilidade Marshall em função do percentual da umidade total.....	70
Figura 3.10 – Fluência Marshall em função do percentual da umidade total.....	70
Figura 3.11 – Preparação da mistura: a) composição granulométrica; b) mistura a branco; c) mistura com água; d) mistura com emulsão.....	72
Figura 3.12 – Mistura em processo de cura antes da compactação: a) no início da cura e b) ao final da cura.....	73
Figura 3.13 – Processo de cura pós-compactação dos corpos-de-prova: a) 24 horas iniciais e b) 24 horas finais.....	73
Figura 3.14 – Processo de estocagem das misturas.....	75
Figura 3.15 – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall.....	77
Figura 3.16 – Prensa para o ensaio de resistência à tração na compressão diametral.....	79
Figura 3.17 – Equipamento para o ensaio de módulo de resiliência.....	82
Figura 3.18 – Equipamento para o ensaio de <i>creep</i> dinâmico.....	86
Figura 4.1– Comparação entre as curvas granulométricas deste estudo GE 0/10 e as curvas PMF – Faixa C DNER e reciclada a frio.....	89
Figura 4.2– Comparação entre as curvas granulométricas deste estudo GE 0/14 e as curvas PMF – Faixa C DNER e reciclada a frio.....	89
Figura 4.3– Comparação entre os teores de ligante residual deste estudo e as curvas PMF – Faixa C DNER e reciclada a frio.....	90

Figura 4.4 – Relação entre o tempo de estocagem das misturas e a massa específica aparente	91
Figura 4.5 – Relação entre o tempo de estocagem das misturas e o volume de vazios.....	93
Figura 4.6 – Relação entre o tempo de estocagem das misturas e a porcentagem de vazios no agregado mineral.	94
Figura 4.7 – Relação entre o tempo de estocagem das misturas e a porcentagem da relação betume-vazios.....	95
Figura 4.8 – Relação entre a estabilidade e o tempo de estocagem das misturas.....	96
Figura 4.9 – Relação entre o tempo de estocagem das misturas e a fluência.....	97
Figura 4.10 – Variação da resistência à tração das misturas GE 0/10 em função do tempo de estocagem.	99
Figura 4.11 – Variação da resistência à tração das misturas GE 0/14 em função do tempo de estocagem.	99
Figura 4.12 – Variação da resistência à tração da GE 0/10 NF com diferentes idades de cura.	100
Figura 4.13 – Comparação entre os valores de resistência à tração deste estudo e as curvas PMF – Faixa C DNER e reciclada a frio.....	100
Figura 4.14 – Variação do módulo de resiliência das GE 0/10 em função do tempo de estocagem.	102
Figura 4.15 – Variação do módulo de resiliência das GE 0/14 em função do tempo de estocagem.	103
Figura 4.16 – Variação do módulo de resiliência da mistura GE 0/10 NF com diferentes idades de cura.	103
Figura 4.17 – Comparação entre os valores de módulo de resiliência deste estudo e as curvas PMF – Faixa C DNER e reciclada a frio.....	104
Figura 4.18 – Deformação permanente das misturas em relação ao tempo de estocagem.....	105
Figura 4.19 – Comparação entre creep dinâmico deste estudo e misturas recicladas a frio. .	106
Figura 4.20 – Desgaste cantabro das misturas em relação ao tempo de estocagem.....	107
Figura 4.21 – Comparação do desgaste de uma mistura de <i>grave-émulsion</i> : a) antes e b) depois da execução do ensaio.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Maiores produtores mundiais de emulsão asfáltica (Deneuvillers, 2007).....	29
Tabela 2.2 – Classificação dos Pré-misturados a frio em função do volume de vazios (Santana, 1993).....	35
Tabela 2.3 – Classes das misturas tipo <i>grave-émulsion</i> (AFNOR, 1993).....	48
Tabela 2.4 – Composições granulométricas das misturas <i>graves-émulsion</i> (NF P 98.121 – AFNOR/93).....	48
Tabela 2.5 – Comparativo entre resultados de ATR em laboratório e em pista de uma mistura de <i>grave-émulsion</i> (Adaptado de BENSE <i>et al.</i> , 2002).....	58
Tabela 2.6 – Análise de alguns trechos de <i>grave-émulsion</i> em rodovias francesas (CARVALHO FILHO E BORDES, 2003).....	60
Tabela 3.1 – Análise granulométrica dos agregados e filler.....	61
Tabela 3.2 – Características dos agregados minerais.....	62
Tabela 3.4 – Distribuições granulométricas estipuladas pela Norma Francesa NF P 98-121(AFNOR 1993).....	64
Tabela 3.5 – Nomenclatura das misturas tipo <i>grave-émulsion</i>	64
Tabela 3.6 – Distribuição do percentual dos agregados para composição granulométrica da mistura GE 0/10 Adaptada.....	65
Tabela 3.7 – Distribuição do percentual dos agregados para composição granulométrica da mistura GE 0/14 Adaptada.....	65
Tabela 3.8 – Composições granulométricas das misturas tipo <i>grave-émulsion</i> estudadas.....	65
Tabela 3.9 – Teores de emulsões utilizados nas misturas.....	68
Tabela 3.10 – Teores de umidade de compactação.....	69
Tabela 3.11 – Valores de estabilidade e fluência Marshall.....	74
Tabela 3.11 – Evolução dos percentuais da umidade de compactação nas misturas com tempo de estocagem.....	76
Tabela 3.12 – Experimentos realizados no estudo.....	76

Tabela 4.1 – Valores das massas específicas.....	91
Tabela 4.2 – Valores das propriedades volumétricas.	92
Tabela 4.3 – Valores de estabilidade e fluência Marshall.	96
Tabela 4.4 – Valores de resistência à tração das misturas estudadas.	98
Tabela 4.5 – Valores do módulo de resiliência das misturas estudadas.	101
Tabela 4.6 – Valores do ensaio de creep dinâmico das misturas estudadas.	104
Tabela 4.7 – Valores do ensaio Cantabro.	106

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AAF	Areia-asfalto à frio
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AETT	Anuário Estatístico dos Transportes Terrestres
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
ATR	Afundamento de trilha de roda
BBF	<i>Béton Bitumineux à Froid</i>
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	Concreto betuminoso usinado à quente
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CP	Corpo-de-prova
d	Valor percentual do desgaste
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DER/PR	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
E	Módulo de <i>creep</i> dinâmico ou módulo de fluência dinâmico ao final do carregamento
GB	<i>Grave betume</i>
GBF	<i>Grave betume à froid</i>
GE	<i>Grave-émulsion</i>
h	Altura do corpo-de-prova
h _r	Altura de referência
IBEF	<i>International Bitumen Emulsion Federation</i>
LA	Lama asfáltica
LAPAV/UFRGS	Laboratório de pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>

LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
MR	Módulo de resiliência
MRA	Microrrevestimento asfáltico
NBR	Norma Brasileira
NF	Norma Francesa
P	Carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova
P ₁	Peso antes do ensaio
P ₂	Peso depois do ensaio
PMF	Pré-misturado à frio
PMFA	Pré-misturado à frio aberto
PMFD	Pré-misturado à frio denso
PMFsD	Pré-misturado à frio semi-denso
RBV	Relação betume vazios
RCS	Resistência à compressão simples
RL	Ruptura lenta
RM	Ruptura média
RR	Ruptura rápida
RT	Resistência à tração
T	Temperatura
VAM	Vazios de agregado mineral
V _v	Volume de vazios
σ_t	Tensão de tração
σ_{axial}	Tensão axial aplicada ao corpo-de-prova
μ	Coefficiente de Poisson
ϵ_{abs}	Deformação absoluta lida diretamente pelo LVDT
ϵ_{esp}	Deformação específica
ϵ_t	Deformação específica recuperável
ϵ_{total}	Deformação total
Δ	Deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga

RESUMO

BALBINOT, J.C. **Estudo de misturas asfálticas a frio do tipo *grave-émulsion***. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

As restrições (custos e meio ambiente) e a evidente necessidade de pavimentação e/ou melhorias das rodovias, nos remetem na busca de novas alternativas. Inserida neste contexto está a mistura asfáltica à frio do tipo *grave-émulsion* empregada com êxito em países europeus, principalmente na França, para manutenção e construção de rodovias com tráfego moderado; destaca-se pelo seu potencial de aplicação, sua competitividade econômica e suas vantagens ecológicas e energéticas. No entanto, no Brasil, ainda não foi amplamente divulgada e principalmente desenvolvida. Esta pesquisa teve como objetivo investigar o comportamento mecânico desta mistura a partir de ensaios laboratoriais de resistência à tração, módulo de resiliência, *creep* dinâmico e desgaste Cantabro. Foram estudadas duas classes de *grave-émulsion*, em cada situação foram realizadas duas misturas, sendo que a concepção seguiu as seguintes premissas: reproduzir curvas granulométricas com valores idênticos aos sugeridos pela Norma Francesa e elaborar curvas que mais se assemelhassem a estes valores propostos, levando em consideração a granulometria do agregado disponível e a utilização de material de enchimento. Uma das principais vantagens da *grave-émulsion* é o adiamento de sua aplicação, assim as misturas foram realizadas com três diferentes tempos de estocagem (0, 14 e 28 dias) antes da compactação com o compactador Marshall. Os resultados mostram que as misturas com tempo de estocagem apresentam resultados inferiores quando comparadas com as misturas sem tempo de estocagem; no entanto, entre as misturas com estocagem os valores estão muito próximos. Mesmo utilizando um teor de ligante residual inferior, a *grave-émulsion* apresenta um comportamento semelhante às demais misturas asfálticas a frio, e para alguns parâmetros, como módulo de resiliência e *creep* dinâmico, quando comparada com os pré-misturados a frio, a *grave-émulsion* apresenta os melhores resultados.

Palavra-chave: *grave-émulsion*, misturas asfálticas a frio, emulsão asfáltica

ABSTRACT

BALBINOT, J.C. **Study of Cold Asphalt Mixes type *Grave-émulsion***. 2007. Dissertation (Master in Engineering) – Post-Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The restrictions (environment and costs), an evident necessity for road paving and/or improvement, leads us to the search of new alternatives. Inserted in this context, the cold asphalt mix, type *grave-émulsion* used in European countries, mainly in France, for the maintenance and construction of roads with moderated traffic, are remarkable for its potential of applicability, economic competitiveness and environmental and energetic advantages. However, in Brazil it has not been divulged and developed. This research has as the main objective to investigate the mechanic behavior of this mixture by laboratory analyses of tensile strength, resilient modulus, dynamic *creep* and Cantabro test. Two classes of *grave-émulsion* were studied, in each situation two mixtures were used, these following these premises: to reproduce granulometric curves with identical values to those suggested by French Standards and to elaborate curves similar to those suggested values, considering the particle size distribution of available aggregates and the use of filler. One of the essential advantages of *grave-émulsion* is the delay of its application, therefore the mixtures were used in three different storage times (0, 14 and 28 days) before compaction using the Marshall compactor. The results showed that mixtures with storage time present lower performance when compared to mixtures without storage time, however, for mixtures with storage the values are very similar. Even utilizing a lower residual asphalt content, *grave-émulsion* presents similar behavior to others cold asphalt mixes and in some parameters, as for the resilient modulus and dynamic creep, when compared to the cold asphalt mixes, the *grave-émulsion* presents the best results.

Key-words: *grave-émulsion*, cold asphalt mixes, asphalt emulsion

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

As primeiras estradas, conhecidas atualmente, somente surgiram no Brasil no século XIX. A necessidade de escoamento dos produtos e o crescimento do intercâmbio comercial entre localidades e regiões exigiam a abertura de rotas mais modernas. Com isso, a primeira rodovia pavimentada do Brasil, hoje conhecida como Washington Luis, foi inaugurada em 1928, ligando a cidade de Rio de Janeiro a Petrópolis. A malha rodoviária a partir da década de 30 recebeu grandes investimentos que possibilitaram sua rápida expansão, sendo as regiões do interior do país o foco do desenvolvimento. A implantação da indústria automobilística também foi um fator determinante para a consolidação do transporte rodoviário como o mais utilizado no Brasil.

No Brasil, a matriz de transporte é predominantemente rodoviária, com esta modalidade correspondendo em 96,2% da matriz de transporte de passageiros e a 61,8% da matriz de transporte de cargas. A rede rodoviária é elemento fundamental nas cadeias produtivas, pois une mercados promovendo a integração de regiões e estados (CNT, 2006).

De acordo com pesquisa realizada pela CNT – Confederação Nacional do Transporte em novembro de 2007, o Brasil possui uma malha rodoviária de 1.603.131 km de rodovias federais, estaduais e municipais, sendo que apenas 12,24% deste total possuem pavimentação. A Figura 1.1 apresenta a situação da malha rodoviária no país.

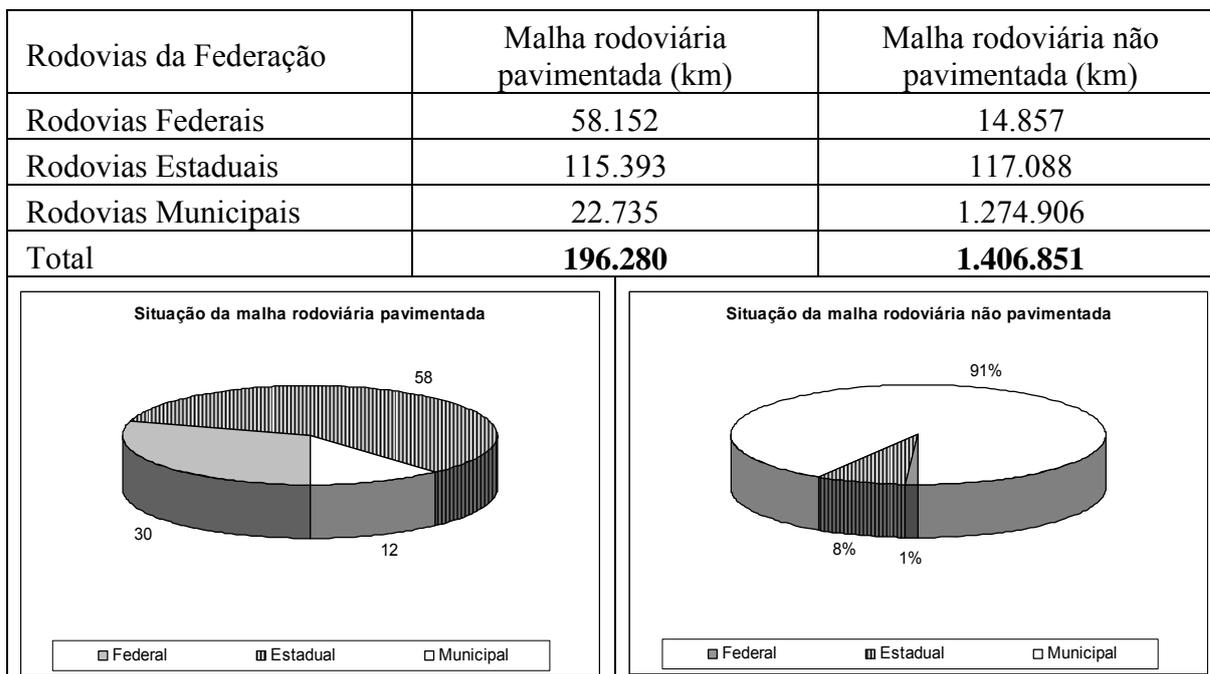


Figura 1.1 – Distribuição da malha rodoviária brasileira (CNT, 2007).

Desta forma, ficam evidentes as necessidades de pavimentação e/ou melhorias das rodovias, principalmente as municipais, para, além de proporcionar benefícios diretos aos usuários com a melhoria dos níveis de conforto e segurança, incrementarem o desenvolvimento socioeconômico, para uma melhor qualidade de vida da população.

O país tem enormes gastos com a manutenção destas vias, assim são necessárias técnicas que abordem a questão visando ao máximo o aproveitamento dos recursos disponíveis, seguindo algumas diretrizes tais como a de conservar os patrimônios disponíveis, restaurar as vias sem conservação, e buscar o aumento da eficiência dos transportes através de seu adequado planejamento.

No contexto atual, verifica-se que as restrições (custos, meio ambiente) orientam para a utilização de técnicas não poluentes e econômicas. A ausência ou afastamento das usinas de revestimentos a quente em certas regiões e os baixos volume de tráfego também remetem os trabalhos às técnicas das misturas a frio.

As técnicas de misturas a frio implicam na utilização de emulsões asfálticas, mas revestir agregados com emulsão asfáltica não é uma idéia nova (THOURET *et al.*, 1998). Embora, conhecida desde o início do século passado, somente passou a ser uma alternativa

versátil a partir da década de 50, tendo um impulso muito grande na Europa a partir da década de 60 (ABEDA, 2001).

As propriedades e características peculiares das emulsões asfálticas proporcionam vantagens técnicas, econômicas e ambientais em relação ao cimento asfáltico de petróleo (CAP), tais como: baixo custo de transporte, estocagem e aplicação, pois, na maioria dos casos, não necessitam de aquecimento; elevado envolvimento e adesividade do ligante aos agregados úmidos, evitando o uso de combustíveis para aquecimento e secagem dos mesmos; disponibilidade em todo o território nacional; eliminam riscos de incêndios e explosões; requerem instalações e equipamentos simples, com baixa demanda energética durante o processo executivo combinado com grandes volumes de produção sem geração de poluentes (ABEDA, 2001).

As misturas asfálticas a frio são versáteis, possibilitando sua produção e estocagem em locais estratégicos para posterior aplicação em serviços rotineiros de conservação, camadas de regularização para melhorar as condições da superfície de rolamento, além da utilização como revestimentos de novos pavimentos.

Inserida na família das misturas asfálticas a frio, destaca-se pelo seu potencial de aplicação, competitividade econômica e uso corrente em países europeus, principalmente na França, a mistura tipo *grave-émulsion*. Apesar desta tecnologia ser empregada com êxito há mais de 40 anos nestes países, para a manutenção e construção de rodovias e dos notáveis progressos dos materiais e procedimentos construtivos, no Brasil, ainda não foi amplamente divulgada e principalmente desenvolvida.

A mistura tipo *grave-émulsion* é executada à temperatura ambiente, sendo composta de agregados com granulometria contínua, água de molhagem e emulsão asfáltica catiônica; espalhada com vibroacabadoras ou motoniveladoras. Entre suas qualidades estão a flexibilidade de fabricação, de uso, de aplicação e a capacidade de armazenamento depois de fabricada.

Suas propriedades e funcionamento não são similares às tradicionais misturas a frio. Segundo Carvalho Filho e Bordes (2003), a *grave-émulsion* diferencia-se do pré-misturado a frio pela sua curva granulométrica ao nível dos elementos finos, pelo teor de asfalto mais fraco, pela riqueza em ligante da argamassa, pelo elevado atrito interno e pela possibilidade de estocagem.

1.2 Objetivo

O objetivo deste estudo foi investigar o comportamento das misturas asfálticas tipo *grave-émulsion* utilizadas amplamente pelos países europeus, para disponibilizar à engenharia rodoviária brasileira uma tecnologia construtiva e/ou de manutenção asfáltica resistente à compressão e às deformações, durável, econômica e adaptada à realidade nacional, para melhorar as condições estruturais e funcionais das rodovias e vias urbanas de baixo e médio volume de tráfego.

1.3 Objetivos específicos

- Realizar ensaios de caracterização de materiais (agregados, materiais de enchimento e ligantes asfálticos) representativos e comercialmente disponíveis, para a elaboração desse tipo de mistura.
- Elaborar misturas do tipo *grave-émulsion* baseadas nas normativas francesas e verificar a possibilidade de estocagem antes de sua utilização.
- Realizar ensaios para avaliar o comportamento mecânico das misturas tipo *grave-émulsion* com diferentes tempos de estocagem, utilizando a infra-estrutura do Laboratório de Pavimentação (LAPAV/UFRGS).
- Comparar os resultados obtidos das misturas tipo *grave-émulsion* com outras misturas asfálticas a frio já estudadas.

1.4 Organização da dissertação

Para favorecer a compressão e análise do estudo desenvolvido, a dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

- No Capítulo 1 – Introdução – apresentam-se as considerações iniciais sobre o tema, o objetivo do estudo e a organização da dissertação.

- O Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – contém uma revisão sobre a mistura tipo *grave-émulsion*, bem como alguns conceitos necessários para compreensão dos métodos e materiais utilizados.
- No Capítulo 3 – Materiais e Métodos – estão descritas as principais características dos materiais utilizados neste estudo, o método experimental e os ensaios realizados para avaliação das misturas.
- O Capítulo 4 – Apresentação e Análise dos Resultados – apresenta os resultados obtidos e as análises e discussões dos resultados.
- O Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões – contém as conclusões deste estudo, bem como as sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agregados

Para Balbo (2007), os agregados podem ser entendidos como conjuntos de grãos minerais, dentro de determinados limites de dimensões, naturais ou artificiais, britados ou não, utilizados na construção civil, notavelmente na fabricação de argamassas, concretos asfálticos e de cimento Portland, misturas estabilizadas com ligantes etc. no ramo da construção pesada de vias de transporte, são de notável aplicação na fabricação de diversas camadas que compõem estruturas de pavimentos e lastros de vias férreas.

De acordo com a norma ABNT NBR 9935/2005, que determina a terminologia dos agregados, o termo agregado é definido como: material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassas e de concreto.

Segundo o Asphalt Institute (2007), a quantidade de agregado mineral em misturas asfálticas de pavimentação é geralmente de 90 a 95% em peso e 75 a 85% em volume. O agregado mineral é essencialmente responsável pela capacidade de suporte de cargas dos pavimentos; portanto, o desempenho dos pavimentos asfálticos é muito influenciado pelo agregado.

Para as finalidades de pavimentação, são diversas as propriedades que devem possuir os agregados, quanto a seu desempenho, para atender aos requisitos necessários para um uso predefinido, como durabilidade, resistência, adesividade ao ligante etc., ou, ainda, a combinação de diversos requisitos mínimos (BALBO, 2007).

Para o DNER (1996), os agregados podem ser classificados segundo sua natureza, tamanho e graduação em:

- Quanto a natureza:
 - agregado natural: são constituídos de grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo ou produzidos por processos de britagem: pedregulhos, seixos, britas, areias, etc.
 - agregado artificial: são aqueles em que os grãos são produtos ou subprodutos de processos industriais por transformação física e química do material: escoria de alto forno, argila calcinada, argila expandida.

- Quanto ao tamanho:
 - agregado graúdo: é o material retido na peneira nº 10 (2,0 mm). Exemplo: britas, cascalhos, seixos, etc.
 - agregado miúdo: é o material que passa na peneira nº 10 (2,0 mm) e fica retido na peneira nº 200 (0,075mm). Exemplo: pó de pedra, areia, etc.
 - agregado (ou material) de enchimento: é o material que passa pelo menos 65% na peneira nº 200 (0,075mm). Exemplo: cal extinta, cimento Portland, pó de chaminé, etc.

- Quanto à graduação:
 - agregado de graduação densa: é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.
 - agregado de graduação aberta: é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, para preencher os vazios entre as partículas maiores.

Segundo Mourão (2003), os agregados têm como principais funções na estrutura do pavimento conferir resistência mecânica e flexibilidade à camada de rolamento e para que o agregado desempenhe bem o seu papel é necessário que o mesmo possua características granulométricas adequadas, resistência mecânica e aderência ao ligante asfáltico.

Os agregados para uso em pré-misturados a frio devem apresentar as seguintes características (DER, 2005):

- Agregado Graúdo: deve ser constituído por pedra britada, apresentando partículas sãs, limpas e duráveis, livres de torrões de argila e outras substâncias nocivas, atendendo os seguintes requisitos:
 - perda de massa no ensaio de durabilidade inferior a 12% (DNER-ME 089/94);
 - perda de massa no ensaio de abrasão Los Angeles igual ou inferior a 40% (DNER-ME 035/98);
 - índice de lamelaridade inferior a 20% (DNER-ME 086/94);
 - cobertura dos agregados no ensaio de adesividade igual ou superior a 90% (NBR 6300).
- Agregado miúdo: deve ser constituído por areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos, apresentando partículas individuais resistentes, livres de torrões de argila e outras substâncias nocivas. Devem ser atendidos, os seguintes requisitos:
 - perda de massa no ensaio de durabilidade inferior a 15% (DNER-ME 089/94);
 - equivalente de areia igual ou superior a 55% (DNER-ME 054/97);
 - é vetado o emprego de areias proveniente de depósitos em barrancas de rios.
- Material de enchimento: quando da aplicação, deverão estar secos e isentos de grumos e tenham uma quantidade passante na peneira nº 200 (0,075mm) de pelo menos 65%.

Na composição de pré-misturados a frio são especificadas cinco faixas granulométricas, A, B, C, D e E (DER/PR – ES-P23/2005).

Segundo Magalhães (2004), a especificação francesa para agregados (NF EN 13043 de out/2003) adotada pela Comunidade Européia, define diversas classes para as características dos agregados e fileres utilizados na pavimentação.

No caso das misturas tipo *grave-émulsion*, são definidas as classes granulométricas 0/10, 0/14 e 0/20. Estes valores indicam os limites em que a granulometria está contida, por exemplo, a granulometria 0/14 está contida entre a peneira 0,075mm e a peneira de 14 mm.

2.2 Emulsão asfáltica

A produção das emulsões asfálticas em escala industrial teve início em 1905, na Europa, com o químico Emile Feigel. No entanto, foi em 1951, que a empresa ESSO, na França, deu um passo importante na utilização deste produto, quando colocou, à disposição do mercado, as emulsões catiônicas (ABEDA, 2001). Nos Estados Unidos a primeira aplicação de emulsões asfálticas catiônicas foi em 1957, enquanto que no Brasil a produção iniciou-se em 1962 (PREGO, 2001).

Uma emulsão pode ser definida como a dispersão de pequenas partículas de um líquido num outro líquido. Assim, a emulsão pode ser formada por dois líquidos não miscíveis onde geralmente a fase contínua é a água (ABEDA, 2001).

A emulsão asfáltica é uma dispersão coloidal de uma fase asfáltica em uma fase aquosa (direta), ou então, uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica (inversa), com ajuda de um agente emulsificante. São obtidas combinando com água o asfalto aquecido, em um meio intensamente agitado, e na presença dos emulsificantes, que têm o objetivo de dar uma certa estabilidade ao conjunto, de favorecer a dispersão e de revestir os glóbulos de betume de uma película protetora, mantendo-os em suspensão (DNER, 1996). A produção das emulsões asfálticas normalmente é através de um processo mecânico em equipamentos de alta capacidade de cisalhamento, denominados moinhos coloidais (ABEDA, 2001).

Segundo Deneuvillers (2007) em estudo realizado pelo IBEF – *International Bitumen Emulsion Federation* no ano de 2005, foram produzidas mais de 8 milhões de toneladas de emulsões asfálticas pelo mundo. O estudo também investigou detalhes a respeito do tipo de aplicação. No entanto, conseguiu respostas para somente 2,2 milhões de toneladas, sendo que 75% deste total de emulsões foram aplicadas na forma de aspersão em serviços como pintura de ligação, imprimação e limpeza de superfície. Os 25% restantes foram empregados na fabricação de misturas como microrrevestimento, pré-misturado a frio, *grave-émulsion*, areia-

asfalto a frio, reciclagem a frio, entre outros. A Tabela 2.1 apresenta os principais produtores mundiais de emulsão asfáltica.

Tabela 2.1 – Maiores produtores mundiais de emulsão asfáltica (Deneuvillers, 2007).

Países	Emulsão (t)
Estados Unidos	2.400.000
França	977.000
México	650.000
Brasil	400.000
Espanha	354.000
Canadá	350.000
Reino Unido	150.000
Itália	135.000
Alemanha	120.000

As emulsões asfálticas são classificadas em função do tempo necessário para que ocorra a separação da fase aquosa da fase asfalto (ruptura) e da carga iônica. O processo de ruptura ocorre quando a emulsão entra em contato com o agregado; pode ocorrer por evaporação de água, por um desequilíbrio eletroquímico, ou pela ação do agregado, que atrai para si os glóbulos de asfalto. A velocidade deste processo de separação depende do tipo de emulsão, reatividade/superfície específica dos agregados, do teor de umidade dos mesmos e da temperatura dos materiais e do ambiente. Visualmente, verifica-se este processo quando a cor da emulsão muda de marrom para preto. As emulsões asfálticas são classificadas, quanto à sua velocidade de ruptura, em ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL) (ABEDA, 2001).

Para Serfass (2002), a ruptura e a aderência de uma emulsão asfáltica, seguida da formação do filme do ligante definitivo, passa pelas fases sistemáticas da Figura 2.1.

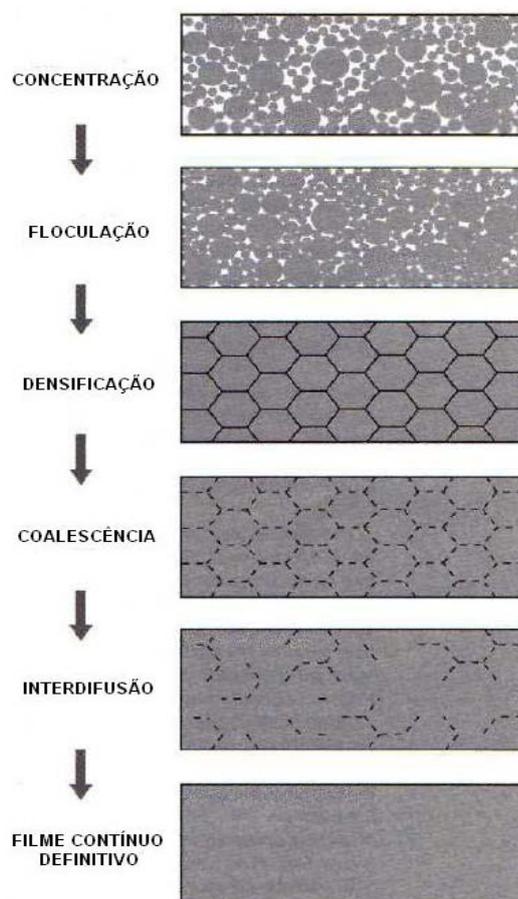


Figura 2.1 – Fases sistemáticas da ruptura das emulsões asfálticas (Adaptado de Serfass, 2002).

Com relação à carga iônica, as emulsões asfálticas são classificadas em três categorias: aniônicas, catiônicas e não iônicas. Na prática, os primeiros dois tipos são usados mais extensamente na construção e na manutenção de estradas. As não iônicas podem tornar-se mais importantes com os avanços tecnológicos das emulsões. As classes catiônicas e aniônicas referem-se à carga elétrica que cerca as partículas de asfalto. Esta carga elétrica é fornecida pelo emulsificante utilizado na produção da emulsão (ASPHALT INSTITUTE, 1997).

Segundo Santana (1993), os emulsificantes catiônicos são os mais utilizados no Brasil, não só porque aqui preponderam os agregados eletronegativos (quartzito, areias quartzosas, granito, gnaise, arenito, entre outros), mas também porque estas emulsões também apresentam boa adesividade com agregados eletropositivos (basalto, calcáreo, etc.). As emulsões aniônicas precederam historicamente as emulsões catiônicas, porém sua média de utilização mundial é de apenas 10% da média de utilização das emulsões catiônicas; o que impede sua maior utilização é sua má adesividade com os agregados eletronegativos.

Para a produção das emulsões asfálticas são necessários três constituintes básicos: asfalto, água e emulsificante. O cimento asfáltico (CAP) é o ingrediente básico para a produção da emulsão asfáltica, na maioria dos casos, representa de 50 a 75% da emulsão. Algumas propriedades do cimento asfáltico afetam significativamente a emulsão, entretanto não há uma correlação exata entre estas propriedades e a facilidade com que o asfalto pode ser emulsificado. Desta forma, o desempenho e as características das emulsões asfálticas dependerão da natureza química e porcentagem das frações de asfalto e de como elas se relacionam entre si (ASPHALT INSTITUTE, 1997).

A complexa interação entre as diferentes frações faz com que seja quase impossível prever exatamente o comportamento de um asfalto emulsificado. Por esta razão, um controle de qualidade constante é mantido na produção das emulsões, na qual cada fabricante tem suas próprias formulações e técnicas de produção, desenvolvidas para conseguir os melhores resultados com o cimento asfáltico e os emulsificantes químicos utilizados (ASPHALT INSTITUTE, 1997).

A maioria das emulsões são produzidas com asfaltos de penetração entre 50-250. Este aspecto é bastante variável e circunstâncias climáticas podem requerer um asfalto mais duro ou mais mole. Em todos os casos, a compatibilidade química do agente emulsificante com o cimento asfáltico é essencial para a produção de uma emulsão estável (ABEDA, 2001).

O segundo ingrediente em quantidade em uma emulsão asfáltica é a água. Sua contribuição às propriedades desejadas do produto final não pode ser minimizada. A água pode conter minerais ou outros materiais que afetam a produção de emulsões asfálticas estáveis (ASPHALT INSTITUTE, 1997). Dependendo do tipo, as emulsões asfálticas podem conter até 50% de água na sua composição e esta característica, em alguns casos, pode dificultar o seu emprego, principalmente nas etapas de mistura com o agregado, compactação e após a compactação (SILVA JÚNIOR e SÓRIA, 2000).

As propriedades da emulsão asfáltica dependem extremamente da composição química do emulsificante. O emulsificante mantém as gotas de asfalto em suspensão estável e controla o tempo de ruptura. É também o fator determinante na classificação das emulsões como aniônica, catiônica ou não iônica (ASPHALT INSTITUTE, 1997).

O principal propósito dos agentes emulsificantes é evitar que as partículas de asfalto se aglomerem, mantendo as duas fases em equilíbrio durante um período de tempo que pode

variar de algumas semanas a alguns meses. O tipo e a concentração dos agentes emulsificantes têm uma relação direta com a estabilidade, resistência ao bombeamento, transporte e armazenamento da emulsão. Estas características devem ser otimizadas para que durante a aplicação, a cura seja adequada e o ligante residual conserve sua capacidade adesiva, de resistência à água e de durabilidade (ABEDA, 2001)

Segundo Clerman (2004), com o aumento da demanda por emulsões asfálticas, novos e mais eficientes agentes emulsificantes estão sendo criados estando comercialmente disponíveis atualmente.

2.3 Água

As misturas a quente não contém, ou quase não contém água. Em contrapartida nas misturas a frio a água é um constituinte indispensável, que desempenha um papel ativo durante as primeiras fases da vida de uma mistura asfáltica a frio. Suas ações são múltiplas: a água é útil num primeiro momento e nefasta em seguida (SERFASS, 2002).

- Desempenhos necessários:
 - é inerte à fabricação da emulsão;
 - ioniza o meio, permite os fenômenos de coalescência e de ruptura.
- Desempenhos úteis:
 - baixar a viscosidade do ligante, permitindo sua repartição;
 - lubrificação do material, facilitando a compactação.
- Desempenhos nefastos:
 - retarda a formação do filme do ligante e o aumento da coesão;
 - contribui para fragilidade na idade jovem.

Mesmo que a norma DNER ME 107/94 (“Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall”) apenas comente: “caso necessário, os agregados poderão ser levemente umedecidos” é recomendável que haja um umedecimento dos agregados antes da

mistura com a emulsão. O papel da água adicionada é favorecer a dispersão da emulsão asfáltica, permitir um bom envolvimento com o agregado e impedir o descobrimento dos finos (MAMLOUK *et al.*, 1980; GODARD, 1991; SANTANA, 1993). Além disso, a água usada na molhagem do agregado tem efeito considerável na trabalhabilidade dessas misturas (SILVA JÚNIOR e SÓRIA, 2000).

Para Tuchumantel Jr. (1990), cada mistura tem sua relação característica entre teor de umidade e grau de envolvimento do agregado. Portanto, é de extrema importância a escolha do teor de molhagem e do teor de umidade para a compactação de cada mistura. Segundo o autor, a umidade de compactação influi na massa específica, teor de vazios e estabilidade.

Alguns valores de água de molhagem são sugeridos na bibliografia.

- Mamlouk *et al.* (1980): 0 a 4,5%;
- Waller Jr. *et al.* (1980): mínimo 1%. Acrescentar teores de água variando em 1% até que toda amostra esteja umedecida;
- Darter *et al.* (1980): 3 a 5%;
- Tuchumantel Jr. (1990): 2,5% para PMFD (Pré-misturado a frio denso) e 2% para PMFsD (Pré-misturado a frio semi-denso);
- Chaignon (1990): 6% teor de água total (*grave-émulsion* 0/14);
- Godard (1991): 5 a 6% teor de água introduzida;
- Quimi-Kao S.A. (1993) *apud* Clerman (2004): emulsões asfáltica com ruptura média (RM) iniciar com 0% e emulsões asfálticas com ruptura lenta (RL) iniciar com 3%;
- Santana (1993): determinar experimentalmente;
- Thouret *et al.* (1998) o melhor comportamento é obtido para uma faixa compreendida entre 6 e 8%;
- Eckmann *et al.* (2002): para uma mistura tipo *grave-émulsion* GE 0/10, teor de água total inicial de 6,5%

- Triquigneux e Brosseaud (2002): 6.2% ($\pm 0,5$) teor de água total (*grave-émulsion* GE 0/14);
- Dierkens (2005): 6 a 8% teor de água total.

Segundo Silva Júnior e Sória (2000), o teor de água a ser adicionado à molhagem dos agregados e o percentual de água presente na mistura no início da compactação afetam claramente o desempenho das misturas com emulsões asfálticas.

Tuchumantel Jr.(1990), Silva Júnior e Sória (2000) e Clerman (2004), demonstraram a importância da umidade na compactação nas misturas a frio e identificaram a existência de um teor ideal de umidade na compactação. Os autores, através do ensaio Marshall com variação na perda de umidade, observaram que os melhores resultados foram obtidos para percentuais de umidade perdida compreendidos entre 30% e 50%.

2.4 Misturas Asfálticas a Frio

As misturas asfálticas a frio existem há décadas. Até o final dos anos 80, estas misturas eram utilizadas principalmente em manutenções e reperfilagens pontuais como camadas de base ou de rolamento. Mais recentemente, as misturas a frio têm despertado novamente interesse devido às suas vantagens aliadas aos progressos das emulsões asfálticas, novas formulações e novos procedimentos para a fabricação e aplicação, tornando assim esta técnica apta a suportar solicitações mais severas, propiciando uma ampliação do seu campo de utilização (SERFASS, 2002).

Segundo Brosseaud (2002), a utilização de misturas a frio vem sendo cada vez mais difundida no meio técnico mundial como solução alternativa na execução de bases e revestimentos asfálticos, graças à sua simplicidade e rapidez de execução a frio. No entanto, no Brasil seu maior emprego ainda se destina à execução de camada de regularização e reforço da estrutura do pavimento (binder) e de serviços rotineiros de conserva tipo tapa buracos (ABEDA, 2001).

As misturas asfálticas a frio são realizadas comumente com emulsões asfálticas catiônicas, caracterizando misturas para serem espalhadas e compactadas na temperatura ambiente (SANTANA, 1993). Várias referências bibliográficas apresentam as misturas a frio,

produzidas com emulsões asfálticas como sendo mais adequadas a utilização destas em climas quentes e para tráfegos leves a médios (THANAYA, 2002b).

Segundo Santana (1993), as misturas asfálticas usinadas constituídas por agregado miúdo são chamadas de argamassas asfálticas e as constituídas por agregados graúdos e argamassa asfáltica são chamadas de pré-misturados.

Entre as misturas asfálticas a frio produzidas com emulsão destacam-se o pré-misturado a frio (PMF), os tratamentos superficiais (lama asfáltica, microrrevestimento), a areia-asfalto a frio e a reciclagem a frio. O pré-misturado a frio consiste numa mistura, em equipamento apropriado, de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (filer) e emulsão asfáltica catiônica convencional ou modificada por polímero (ruptura média ou lenta) espalhada e compactada em pista a temperatura ambiente (ABEDA, 2001).

Segundo Santana (1993), a classificação dos pré-misturados a frio envolve a granulometria (quantidade de argamassa e de agregados) e a quantidade de vazios. Tradicionalmente, conforme mostra a Tabela 2.2, os PMFs com pouquíssima argamassa (pass. # n°10: $\leq 10\%$), praticamente sem filer (pass. # n°200: $\leq 2\%$) e com alto teor de vazios (%Vv $> 22\%$) são chamados de pré-misturados à frio abertos (PMFAs). Aumentando-se moderadamente no PMFA a quantidade de argamassa e filer (pass. # n°10: $> 10\%$, $\leq 20\%$; pass. # n°200: $\leq 5\%$) e diminuindo um pouco o teor de vazios (%Vv: $> 15\%$, $\leq 22\%$), obtêm-se os pré-misturados a frio semi-densos (PMFsD). Já os PMFs com quantidade apreciável de argamassa e filer (pass. # n°10: $> 20\%$; pass # n°200 $\leq 8\%$) e limitando o teor de vazios (%Vv: $\leq 15\%$) são chamados de pré-misturados a frio densos (PMFDs).

As principais vantagens dos pré-misturados à frio são: utilização de equipamentos simples trabalhabilidade à temperatura ambiente, possibilidade de utilização de agregados úmidos, baixo consumo de energia durante as operações e redução de emissão de poluentes (ABEDA, 2001).

Tabela 2.2 – Classificação dos Pré-misturados a frio em função do volume de vazios (Santana, 1993).

PMF	P - % passando em peso		Volume de Vazios (%)
	n° 10 (2mm)	n°200 (0,075mm)	
PMFA	$P \leq 10$	$P \leq 2$	$34 > V_v > 22$
PMFsD	$20 \geq P > 10$	$P \leq 5$	$22 \geq V_v > 15$
PMFD	$P > 20$	$P \leq 8$	$9 < V_v \leq 15$

O tratamento superficial denominado lama asfáltica (LA) consiste de uma associação, em consistência fluida, de agregados minerais, material de enchimento (fíler), emulsão asfáltica e água, uniformemente misturada e espalhada no local, à temperatura ambiente. O principal campo de aplicação é na manutenção preventiva, mas também pode ser aplicada como revestimento final sobre bases estabilizadas ou sobre tratamentos superficiais envelhecidos, entretanto, sem função estrutural. Suas principais vantagens são: fácil execução; elevada produtividade, redução na frequência de interdição da via para manutenções, redução de perdas de agregados pelo tráfego e rejuvenescimento da textura (ABEDA, 2001).

O microrrevestimento asfáltico (MRA) também pertence à família dos tratamentos superficiais. Trata-se de uma mistura, de emulsão modificada por polímeros, agregado, fíler, água e aditivos para controle de ruptura da emulsão. Sua principal aplicação é na conservação de pavimentos que necessitam apenas de rejuvenescimento e melhoria das condições de aderência pneu-superfície de rolamento. O MRA proporciona o aumento da vida de serviço e economia na manutenção do pavimento melhorando também as condições de conforto e segurança para o usuário. Além de utilizado como revestimento final sobre pavimentos asfálticos e bases estabilizadas, pode ser empregado subjacente ao recapeamento, para reduzir a espessura do reforço (ABEDA, 2001).

A areia-asfalto à frio (AAF) é uma mistura produzida com o uso de agregado miúdo, com ou sem fíler e emulsão asfáltica catiônica (SILVEIRA, 1999). É uma mistura utilizada, principalmente, na execução de regularizações, camada final de revestimento asfáltico e serviços do tipo tapa-buracos, como uma solução alternativa para viabilizar a pavimentação em regiões onde há carência de agregados pétreos e o custo de transporte dos materiais é elevado. O agregado miúdo pode ser constituído de areia, pedrisco, pó-de-pedra, pó de escória ou mistura de ambos (ABEDA, 2001).

Segundo o Asphalt Institute (1983), *apud* David (2006), a reciclagem à frio é definida como um processo em que o material removido do pavimento é combinado com ligante asfáltico novo e/ou agentes de reciclagem, agregado virgem (se necessário) produzindo misturas a frio no local ou em usina para serem utilizadas como camada de base para obter uma nova estrutura. Sobre essa camada aplica-se um tratamento superficial ou uma mistura asfáltica como microrrevestimento asfáltico ou concreto asfáltico, com a função de proteger a camada reciclada dos danos causados pela água e da abrasão provocada pelo tráfego. Suas principais vantagens são: eliminação de exploração de novas jazidas de agregados;

aproveitamento total dos materiais do pavimento existente; mínima alteração do perfil original da via; curta interrupção do tráfego.

Segundo a terminologia francesa (NF P 98-121/2000), as misturas a frio são classificadas em:

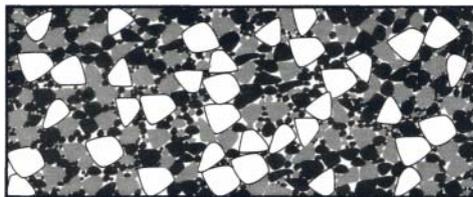
- *Enrobé hydrocarboné à froid*: revestimento hidrocarbonado a frio realizado a partir de agregados, de um ligante hidrocarbonado, e eventualmente, de aditivos, cujas características permitem um revestimento sem secagem e aquecimento dos agregados.
- *Grave-émulsion*: revestimento hidrocarbonado a frio destinado à reperfilagem, ou utilizado em camadas de base.
- *Béton bitumineux à froid (BBF)*: concreto asfáltico a frio não estocável (utilização em 24 horas) destinado à realização de camadas de rolamento de rodovias para tráfegos leves a médios, com aplicação de espessuras compreendidas entre 5 e 8 cm.
- *Enrobé à froid stockable*: revestimento hidrocarbonado a frio que pode ser estocado durante várias semanas ou vários meses, destinado à manutenção corrente de rodovias (reparos localizados, deflexões, e/ou pequenos trabalhos, não tendo função estrutural nas rodovias).

Segundo Serfass (2002), estas definições são bastante simplificadas e não refletem inteiramente a prática. Vários pontos precisam ser mais precisos, completos e modificados. A fim de melhorar a terminologia, o autor apresenta algumas propostas:

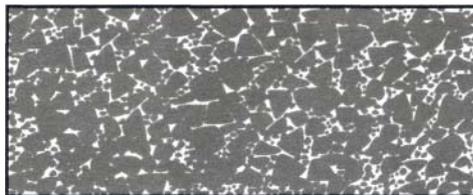
- Quando se trata de revestimentos a frio, implica na utilização de emulsão asfáltica;
- Para as camadas de rolamento, aplicar sistematicamente o termo de *béton bitumineux à froid (BBF)*, com a seguinte definição: concreto asfáltico a frio, não estocável ou de curta estocabilidade, utilizado unicamente em camadas de rolamento, de granulometria 0/D ou d/D, onde a totalidade ou parte dos agregados são revestidos com emulsão asfáltica modificada ou não e com pelo menos uma porção de agregados sem secagem;

- Para as camadas de base, aplicar o termo *grave-émulsion*, com a seguinte definição: mistura de um agregado 0/D e de uma emulsão asfáltica, no qual o ligante está fixado preferencialmente sobre a parte “argamassa”, podendo ser utilizada tanto em camadas de base, como em reperfilagem. A mistura permite a estocagem;
- *Grave betume à froid (GBF)*: revestimento a frio não estocável, utilizado unicamente em camada de base, de granulometria 0/D, cuja totalidade ou parte dos agregados são revestidos com emulsão asfáltica modificada ou não e com pelo menos uma porção de agregados sem secagem;
- *Enrobé à froid stockable*: revestimento a frio podendo ser estocado por várias semanas ou meses, destinado à manutenção corretiva (reparos localizados). Pode exercer função estrutural apenas em rodovias de tráfego muito leve.

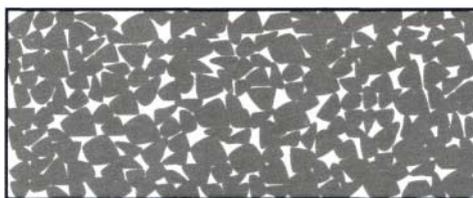
Para Serfass (2002), estas definições têm a vantagem de abranger todos os revestimentos com emulsão incluindo aqueles obtidos por procedimentos de duplo revestimento ou revestimento seqüencial. A Figura 2.2 apresenta diferentes tipos de misturas a frio com emulsão.



Grave-émulsion- agregados graúdos parcialmente revestidos em uma argamassa rica.



Béton bitumineux à froid dense e Grave betume à froid – granulometria contínua, todos os agregados revestidos.



Béton bitumineux à froid ouvert - agregados graúdos e médios revestidos, sem finos.

Figura 2.2 – Representação esquemática de diferentes tipos de misturas a frio com emulsão (SERFASS, 2002).

2.4.1 Particularidades do comportamento

Para Serfass (2002), as misturas com emulsão têm várias considerações e um comportamento particular que as diferencia das misturas a quente. No entanto, devido a alguns pontos ainda não serem inteiramente conhecidos o emprego das misturas a frio continua sendo limitado.

Uma vez aplicadas, as misturas a frio distinguem-se pelo fato que ainda contêm uma quantidade de água importante. Progressivamente à saída desta água, principalmente pela evaporação, as propriedades destes revestimentos evoluem (POIRIER *et al.* 2002a).

Segundo Serfass (2002), os revestimentos com emulsão são materiais evolutivos, que passam de um estado inicial (não ligado) a um estado último (fortemente ligado) devido a

alguns fenômenos como: coalescência do filme do ligante, colagem progressiva dos grãos minerais revestidos (efeito da compactação e tráfego inicial) e à compressão progressiva do esqueleto mineral (efeito da compactação e do tráfego). A água tem influência sobre esta evolução tanto que, caso não tenha sido suficientemente expelida, a consolidação é travada e o revestimento permanece frágil (coesão insuficiente).

A obtenção rápida de uma coesão elevada é um desafio crucial e um fator de sucesso, porém, também pode significar uma difícil aplicação em obras devido à perda da trabalhabilidade do material. Para garantir um grau de compactação suficiente e uma união desejável é necessário encontrar uma boa relação entre coesão inicial e a trabalhabilidade (SERFASS, 2002).

O grau de compactação de uma mistura asfáltica é uma característica essencial, influenciando a quase totalidade das propriedades mecânicas. Os valores do grau de compactação medidos *in situ* para as misturas a frio, são sistematicamente mais baixos que em uma mistura a quente diretamente comparável. Os desvios observados situam-se geralmente entre 7 e 9 pontos para camadas de rolamento e entre 6 e 8 pontos para camada de base. Entretanto, enquanto o grau de compactação das misturas a quente evolui pouco, nas misturas a frio ocorre um aumento durante os primeiros meses ou anos, devido à maturação e consolidação do tráfego. O ganho correspondente pode atingir 5 pontos, ou mais. (SERFASS, 2002).

Quando uma mistura a quente apresenta um grau de compactação baixo, podem surgir rapidamente deformações, afundamentos em trilha de roda, ou até mesmo desagregação. Entretanto, embora pareçam pouco compactos, não se constata estes danos nas misturas a frio. (SERFASS, 2003).

Para explicar esta diferença de comportamento, Serfass (2002) analisou, através de imagens microscópicas, duas misturas, ambas constituídas a partir do mesmo tipo de agregado. A mistura a quente possui um teor de 5,0% de asfalto 70/100, enquanto a mistura a frio possui um teor de emulsão asfáltica de 7,7% originado do mesmo asfalto 70/100 e resultando em igual teor de 5,0% de ligante residual. O volume de vazios medido para as misturas a quente e a frio foram respectivamente de 15,2% e 15,3%.

As distribuições dos vazios para as duas misturas, apresentadas nas Figuras 2.3 e 2.4 mostram claramente a diferença entre as misturas a quente e a frio. Para uma porcentagem de

vazios global idêntica, a mistura a frio contém um maior número de vazios de pequena e muito pequena dimensão que a mistura a quente. Sobre duas áreas iguais, detectou-se 7200 vazios na mistura a frio e 332 vazios na mistura a quente.

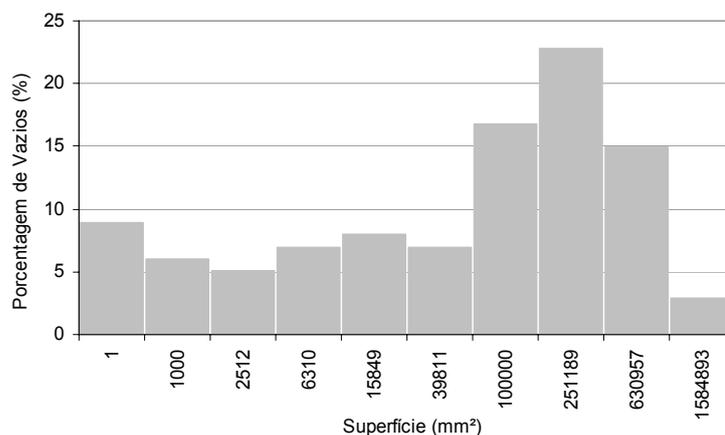


Figura 2.3 – Distribuição dos vazios de uma mistura asfáltica a quente (Adaptado de SERFASS, 2002).

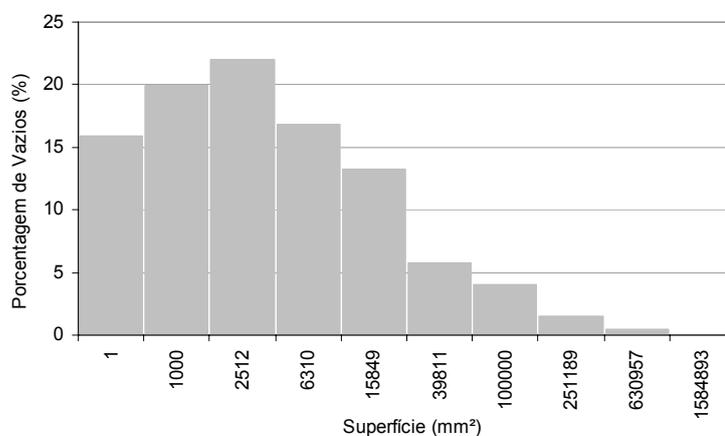


Figura 2.4 – Distribuição dos vazios de uma mistura asfáltica a frio (Adaptado de SERFASS, 2002).

Para Serfass (2002), os múltiplos pequenos vazios na mistura a frio parecem resultar dos fenômenos ligados à coalescência dos glóbulos da emulsão asfáltica. Durante esta coalescência, numerosas cavidades microscópicas, preenchidas de ar e água, encontram-se presas no filme do ligante ou, mais precisamente na argamassa que reveste as partículas maiores. Esta existência de vazios de pequena e muito pequena dimensão explica o fato do grau de compactação de uma mistura a frio ser inferior à de uma mistura a quente diretamente comparável. O tempo normalmente adotado para compactação torna os compactadores

impotentes, e estes vazios minúsculos somente desapareceram progressivamente, sob a ação prolongada e combinada da maturação e da consolidação do tráfego.

Assim é necessário evitar raciocinar da mesma maneira que para as misturas a quente, e sugere-se o cuidado nas comparações de desempenhos, em especial, evitar comparar misturas a frio com pouca idade e misturas a quente. Apenas a longo prazo a textura interna de uma mistura com emulsão torna-se semelhante a uma mistura a quente (SERFASS, 2002).

2.4.2 Processo de Cura

Para Silva Júnior e Sória (2000), uma das características muito importantes das misturas asfálticas a frio é a cura. Este processo de perda de água da mistura pode ocorrer antes e depois da compactação. A eliminação da água contida nas misturas feitas com emulsão é muito importante nas fases de dosagem e execução no campo e muitos autores fazem referência a este processo.

Mamlouk *et al.* (1980) afirmam que a principal desvantagem das misturas com emulsão asfáltica é o lento desenvolvimento da estabilidade (resistência), que é favorecida pela perda de umidade da mistura.

Fazendo uma breve avaliação de alguns métodos de projeto para misturas de emulsões asfálticas, conclui-se que o procedimento de cura possui um efeito significativo nos resultados obtidos. Em alguns métodos é feita cura antes da moldagem dos corpos-de-prova, em outros é feita cura dos corpos-de-prova após a moldagem ou os dois procedimentos de cura (SILVA JÚNIOR e SÓRIA, 2000).

2.4.3 Cura antes da compactação

Mamlouk *et al.* (1980), investigaram o efeito da cura antes da compactação em misturas com emulsão asfáltica em duas condições: à temperatura de 22°C (considerada temperatura ambiente) e a 60°C (feita em estufa), os autores usaram um critério onde a quantidade de água presente na mistura não deveria exceder 4,5% do peso do agregado seco para que a mistura fosse compactada. Este teor de umidade foi obtido após 1 hora de cura a 60°C e após 10 horas de cura à temperatura ambiente.

Segundo Mamlouk *et al.* (1980), o tempo de cura antes da compactação não é apenas importante quanto à remoção da água em excesso existente na mistura, mas também promove uma melhor camada de cobrimento da emulsão sobre o agregado. A cura feita em estufa é considerada favorável à misturação e à compactação. No entanto, Waller Jr. (1980) ressalta que a cura das misturas com emulsão asfáltica feita em estufas, acima da temperatura ambiente, pode não ser realista e interferir nas suas propriedades.

Como a cura antes da compactação traz melhorias significativas aos projetos dessas misturas, há uma necessidade de se determinar um tempo conveniente para a eliminação da água contida nas misturas (SILVA JÚNIOR e SÓRIA, 2000).

A norma DNER ME 107/94, (“Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – Ensaio Marshall”), recomenda cura à temperatura ambiente de quatro a seis horas, mas no caso de utilização de emulsão asfáltica de ruptura lenta, o período de cura deverá ser no máximo de 60 minutos.

Silva Júnior e Sória (2003) investigaram a influência do processo de cura antes da compactação dos corpos-de-prova de duas maneiras: a primeira dosagem, chamada de normalizada foi realizada de acordo com o método do DNER ME 107/94 que recomenda tempo máximo de cura antes da compactação de 60 minutos à temperatura ambiente. Na segunda dosagem, chamada de modificada, o processo de cura foi realizado à temperatura ambiente com controle da perda de umidade até o valor de 30% de umidade perdida, percentual que era atingido aproximadamente 6 horas após a mistura.

Segundo os autores, na dosagem normalizada, a falta de cura antes da moldagem dos corpos-de-prova influenciou de forma negativa os resultados obtidos. A moldagem foi relativamente trabalhosa, pois houve perda de material asfáltico e perda de massa da mistura quando o soquete de compactação foi retirado e as dimensões dos corpos-de-prova foram bastante variadas. Na dosagem modificada, a realização da cura mais prolongada antes da moldagem dos corpos-de-prova favoreceu a perda de umidade das misturas, e influenciou de forma positiva nos resultados obtidos, o processo de moldagem foi feito de maneira menos trabalhosa. De um modo geral, os resultados obtidos na dosagem modificada foram superiores aos da dosagem normalizada, constatando-se que a cura antes da compactação das misturas pode influenciar significativamente nos resultados finais do ensaio.

Clerman (2004) adotou a cura antes da compactação a uma temperatura de 40°C. As misturas permaneceram em estufa até que fosse atingida a umidade ideal para compactação. O teor de umidade foi controlado por pesagens ao longo do tempo.

2.4.4 Cura após a compactação

Segundo Silva Júnior e Sória (2003), após a compactação das misturas também é importante providenciar a cura. As misturas com emulsão asfáltica têm sua resistência aumentada com a perda de água existente na emulsão, ou na mistura em si. A cura de corpos-de-prova após a compactação pode trazer ganhos de resistência e simular a cura ocorrida em campo ao longo dos meses. Diversos modos de cura podem ser encontrados, desde métodos que utilizam a cura à temperatura ambiente até os que utilizam a cura em estufa a temperaturas mais elevadas.

Eckmann *et al.* (2002) comentam que a aplicação em campo e a compactação das misturas a frio deixam um material com uma certa quantidade de água cuja evaporação pode durar várias semanas ou mesmo vários meses, dependendo da espessura da camada e das condições climáticas. Para simular as mesmas condições em laboratório é necessário acelerar a saída de água residual.

Segundo Darter *et al.* (1980), o processo de cura toma importância maior quando se verifica que não há um consenso entre os métodos de dosagem de mistura a frio quanto aos procedimentos de cura que devem ser considerados representativos do processo que ocorre em campo. Em laboratório, a evaporação rápida feita em estufa pode não ser uma simulação adequada, pois em campo, a velocidade do processo depende das condições ambientais. Os autores desenvolveram um procedimento de ensaio para avaliar a influência do tempo de cura, onde grupos de corpos-de-prova foram curados a temperatura ambiente e ensaiados em momentos diferentes, desde imediatamente após a compactação até 48 dias depois da moldagem. Observaram que a perda de umidade aconteceu muito rapidamente durante os dias iniciais do procedimento, variando de 5,8% para 0,6%, o que teria causado um aumento rápido da resistência dos corpos-de-prova devido à taxa de perda de umidade das misturas. Concluíram que três dias de cura à temperatura ambiente seria o suficiente para se obter uma estabilidade mínima aceitável.

Segundo Silveira (1999), como o modo e o tempo de cura afetam o teor de umidade do corpo-de-prova, os resultados encontrados por um determinado método de dosagem estarão diretamente atrelados à forma como o método considera a cura. Desta forma, um método que utiliza cura mais severa e demorada, com maior gradiente de temperatura e umidade, provavelmente levará a valores de resistência superiores aos de outro método com cura mais branda, com menores gradientes de temperatura.

Mamlouk *et al.* (1980) apresentaram três procedimentos de cura em corpos-de-prova moldados no equipamento Marshall. No primeiro, a cura foi feita durante um dia à temperatura ambiente (22°C) dentro do molde. No segundo procedimento, o tempo de cura durou três dias à temperatura ambiente (22°C) fora do molde, e no terceiro a cura ocorreu em estufa fora do molde durante três dias a uma temperatura de 49°C, que representaria o processo de cura em campo a longo prazo. Os autores constataram que a condição de cura fora do molde beneficia a perda de umidade, pois a área superficial para saída da água era maior do que quando dentro do molde.

Thanaya (2002a) realizou o processo de cura pós compactação em 48 horas, sendo as primeiras 24 horas no molde e as restantes fora do molde, ambas a temperatura de 40°C.

Segundo Takamura (2003) *apud* Clerman (2004), a melhor simulação do processo de cura em campo é a cura das amostras compactadas durante três dias: o primeiro dia à temperatura ambiente e os próximos dias em estufa a 60°C.

Clerman (2004) em seus corpos-de-prova realizou uma cura pós compactação de 48 horas de cura, sendo as primeiras 24 horas no molde à temperatura de 50°C e o restante fora do molde à temperatura de 40°C.

A norma DNER 107/94, (“Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – Ensaio Marshall”), recomenda cura pós compactação com o corpo-de-prova no molde durante 24 horas à temperatura de 60°C.

Santana (1993) insiste na importância de todos os laboratórios nacionais usarem um único método de dosagem para misturas que utilizem emulsões como ligantes para que se possa assim comparar os resultados e esclarecer dúvidas, tais como: tempo de cura antes da compactação e cura após a compactação dos corpos-de-prova até antes do ensaio de estabilidade.

2.5 Misturas asfálticas tipo *grave-émulsion*

A mistura tipo *grave-émulsion* utilizada na França, deriva de uma técnica econômica de tratamento de estradas secundárias, utilizada após a 2ª Guerra Mundial, que consistia em estabilizar em campo os materiais existentes por incorporação de emulsão. Num segundo momento ocorreu a adição de materiais granulares para correção da granulometria antes do tratamento com emulsão, o que propiciou bons resultados e incitou o desenvolvimento da técnica para a reparação de estradas, utilizando agregados inteiramente produzidos (TRIQUIGNEAUX e BROSSEAUD, 2002).

Segundo Carvalho Filho e Bordes (2003), o procedimento consistia das etapas de (Figura 2.5):

- » Escarificação
- » Gradeamento
- » Regularização
- » Adição de Material Granular
- » Espargimento de Emulsão
- » Gradeamento
- » Regularização Final
- » Compactação

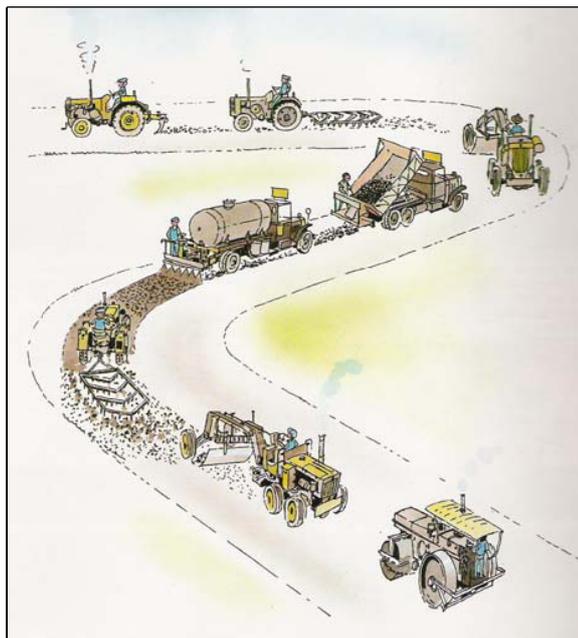


Figura 2.5 – Etapas de execução dos serviços nas primeiras experiências com *grave-émulsion* (Carvalho Filho e Bordes, 2003).

No início dos anos 60, a mistura tipo *grave-émulsion* passou a ser formulada com emulsões catiônicas e produzidas em centrais de revestimentos a frio, procedimentos que propiciaram uma melhora significativa na qualidade do material. Após um começo promissor, esta técnica viveu momentos de estagnação. Nos últimos anos, graças a alguns pesquisadores e algumas melhores definições a respeito dos materiais, do desempenho e das áreas de aplicação, a técnica vem despertando novamente um novo interesse (CARVALHO FILHO e BORDES, 2003).

A *grave émulsion* é uma mistura asfáltica a frio destinada a camadas de base ou sub-base e manutenção, elaborada em centrais de misturas fixas ou móveis a partir de agregados reconstituídos com uma graduação contínua bem definida, de emulsão asfáltica catiônica, de água e eventualmente aditivos, espalhada com vibroacabadoras ou motoniveladoras na temperatura ambiente (GODARD, 1991).

Para BOUSSAD *et al* (1997), a *grave émulsion* é um material original no qual a emulsão reveste majoritariamente os finos e as areias, formando com eles uma argamassa de forte coesão, enquanto que os elementos graúdos encaixam-se nesta argamassa conservando entre eles um contato seco, de modo que juntos apresentem um valor elevado de atrito interno. Contudo, a quase ausência de asfalto sobre os elementos graúdos reduz notavelmente a sua resistência a tração.

2.5.1 Classificação

A Norma Francesa NF P 98-121 (AFNOR, 1993) distingue três tipos de misturas de *grave émulsion*, conforme Tabela 2.3. O Tipo 1 é apropriado para serviços de reperfilagem ou reparos localizados, com teor de asfalto residual superior a 4,2% possibilitando neste caso espessuras muito variáveis, desde 12 cm até 0 cm. Os Tipos 2 e 3 são destinados às camadas de base e reforço de subleito; possuem função estrutural, com teores de asfalto residual superiores a 3,2% e 3,8%, respectivamente. Suas granulometrias variam entre 0/10, 0/14 e 0/20.

Tabela 2.3 – Classes das misturas tipo *grave-émulsion* (AFNOR, 1993).

Grave-émulsion	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
Granulometria	0/10	0/14	0/10	0/14	0/14	0/20
Teor de asfalto residual (%)	≥ 4,2		≥ 3,2		≥ 3,8	
Espessuras das camadas (cm)	0-8	0-12	6-10	6-12	6-12	8-15

A norma também fornece alguns elementos sobre a granulometria das misturas, os quais permitem o início das formulações. Conforme Tabela 2.4, a fração de agregados graúdos prevalece no esqueleto mineral da mistura, com 95% passando nas peneiras 10 mm e 14 mm, já os agregados finos (passando na peneira de 2,0 mm) com 33 a 40% e 6 a 8% passando na peneira de 0,08mm.

Tabela 2.4 – Composições granulométricas das misturas *graves-émulsion* (NF P 98.121 – AFNOR/93).

Peneiras (mm)	Porcentagem Passante (%)				
	Grave-émulsion Tipo 1		Grave-émulsion Tipo 2 e 3		
	0/10	0/14	0/10	0/14	0/20
20	----	----	----	----	95
14	----	95	----	95	----
10	95	----	95	----	----
6,3	60	60	55	58	55
2,0	40	40	38	36	33
0,5	19	19	18	18	17
0,08	7	7	7	7	6

2.5.2 Emprego das misturas tipo *grave-émulsion*

A aplicação desta mistura é aconselhável nos seguintes casos:

- **Reperfilagem**

Segundo Chaignon (1990) e Carvalho Filho e Bordes (2003), a reperfilagem é um emprego privilegiado da mistura tipo *grave-émulsion*, pois além de propiciar a impermeabilização do pavimento antigo, corrige o perfil de trechos de pavimento que apresentam desgastes com grandes deformações, sem contar com a possibilidade de ser aplicada em espessuras variadas podendo aproximar-se até a espessura zero, como pode ser observado na Figura 2.6.

Carvalho Filho e Bordes (2003), comentam que a reperfilagem deve ser seguida de um tratamento superficial, de uma lama asfáltica ou uma camada delgada de CBUQ (granulometria descontínua com agregado de diâmetro máximo de 6 mm – 0/6) ideal para trechos urbanos.

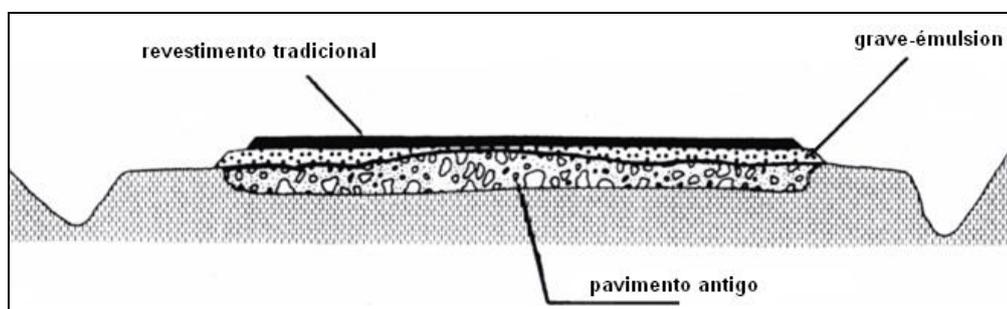


Figura 2.6 – Reperfilagem com *grave-émulsion*. (Adaptado de Chaignon, 1990).

- **Reparos localizados**

A mistura asfáltica tipo *grave-émulsion* também é de fácil utilização em atividades de manutenção corretiva como em tapa buracos, melhoramentos localizados do perfil e, de modo geral, em todas as aplicações que necessitam de pequenas quantidades de material (GODARD, 1991).

Segundo Godard (1991), para o uso em pontos localizados a mistura deve ter uma boa trabalhabilidade, o que implica em uma granulométrica mais fina (0/6 a 0/12) e um teor de asfalto residual mais elevado (acima de 4,2%). Isto possibilita deixar o tráfego sobre a obra terminada sem precisar de outra proteção; nenhum revestimento é necessário. É um tipo de *grave-émulsion* mais flexível.

▪ **Camadas de reforços e recapeamentos**

Segundo Chaignon (1990), para uso em camadas de reforços de vias secundárias, a mistura tipo *grave-émulsion* é uma das técnicas mais adequadas na França, pois utiliza a sua flexibilidade para adaptar-se e resistir a importantes deformações do subleito, assim sendo muito utilizada sobre terraplenagem e sobre zonas deformáveis de vias secundárias.

A mistura também pode ser utilizada para evitar a reflexão de trincas. O efeito de absorção das fissuras é devido à estrutura do material, argamassa plástica e agregados graúdos com um atrito interno elevado. Capaz de aceitar deformações importantes sem transmiti-las e sem gerar tensões importantes, isso está relacionado ao módulo elástico relativamente baixo em comparação a um concreto cimento ou um concreto asfáltico (GODARD, 1991).

Chaignon (1990) e Godard (1991) comentam que é conveniente empregar uma mistura tipo *grave-émulsion* com granulometria 0/14 ou 0/20 com fração passante na peneira de 2 mm compreendido entre 35 e 40% e um teor de ligante residual entre 3 a 3,6%. Em geral é necessário um revestimento, este pode ser de concreto asfáltico ou um tratamento superficial, mas em certos casos não há necessidade de nenhum revestimento.

2.5.3 Principais Vantagens

Segundo alguns autores (Godard, 1991; Serfass, 2002; Carvalho Filho e Bordes, 2003) as principais vantagens da *grave-émulsion* são as seguintes:

- **Economia de energia:** como toda a mistura a frio, a *grave-émulsion* é aplicada à temperatura ambiente, sem a necessidade de secagem prévia dos agregados e sem o aquecimento dos materiais e da massa asfáltica durante a produção, transporte, armazenamento e aplicação. Assim, o consumo de energia necessário para estas etapas é notavelmente inferior em relação às misturas a quente;

- **Benefícios ambientais:** como os materiais não são aquecidos, não há emissão para o meio ambiente de poeira, material particulado e de gases, provenientes da queima de combustíveis e do aquecimento do asfalto;
- **Espessuras variáveis:** permite uma aplicação com espessura variável entre 0 e 12cm, principalmente em reperfilagens de camadas deformadas. É sua argamassa asfáltica que permite espessuras quase nulas; nestes lugares não há elementos graúdos.
- **Material flexível:** por ser uma mistura flexível, possui um bom comportamento sobre camadas flexíveis, tendo a capacidade de suportar as deformações sem romper; isto se deve à sua argamassa rica em asfalto;
- **Deformações:** a presença de elementos graúdos pouco revestidos com asfalto eleva a coesão interna (atrimento seco) reduzindo as deformações;
- **Armazenagem:** pode ser armazenada por vários meses, fazendo com que sua flexibilidade de utilização seja bastante ampla. Isto permite produzir uma quantidade grande de material e utilizá-lo somente quando houver necessidade, bastando apenas uma pequena correção na umidade do material quando utilizada. A mistura tipo *grave-émulsion* deve ser protegida, quando for armazenada.

2.5.4 Principais Desvantagens

A qualidade da mistura, no entanto é o maior problema das misturas tipo *grave-émulsion*, assim como das demais misturas a frio. Segundo Dierkens (2005), inúmeras pesquisas consagraram-se em estudos de mecanismo de ruptura (aspectos físico-químicos); em contrapartida, poucas pesquisas levaram em conta as relações que existem entre o aumento da coesão das misturas (aspectos mecânicos), suas transformações estruturais (etapas de aplicação) e as características de formulação (teor de asfalto, massa específica, etc.).

A presença de água constitui um segundo problema. A água é necessária na fabricação da mistura, facilitando a manipulação e compactação dos materiais, bem como a compactação. A compactação não expulsa completamente a água, ela continua presente na mistura e acaba por deixar vazios, evaporando-se durante o passar do tempo. Assim, o

desempenho mecânico da mistura diminui e somente passa a evoluir após ação combinada da cura e do tráfego (DIERKENS, 2005).

2.5.5 Comportamento das misturas tipo *grave-émulsion*

Eckmann *et al.* (2002) avaliaram a evolução dos teores de água residual e das propriedades mecânicas de uma mistura de *grave-émulsion* GE 0/10 com 4,2% de ligante residual (70/100) e com um teor de água total inicial de 6,5% em relação aos agregados secos. Após a moldagem e compactação, de maneira a obter teores de vazios comparáveis aos habitualmente observados em campo (14%), três conjuntos de corpos-de-prova foram colocados nas seguintes condições: temperatura de 18°C e 50% de umidade relativa; temperatura de 50°C e 50% de umidade relativa e temperatura de 50°C e 10% de umidade relativa. Os corpos-de-prova não desmoldados foram colocados imediatamente no recinto climático e o dia da compactação foi tomado como referência na medição do tempo de cura. A retirada dos corpos-de-prova dos moldes ocorreu um dia após a compactação. Os teores de água residual foram determinados por pesagem e as resistências por compressão foram medidas entre o primeiro e o trigésimo dia de cura no recinto climático.

A Figura 2.7 apresenta a evolução do teor de água em função do tempo de cura nas diferentes condições de conservação, e a Figura 2.8 o aumento de coesão da mistura, traduzida pela sua resistência a compressão, em função do teor de água.

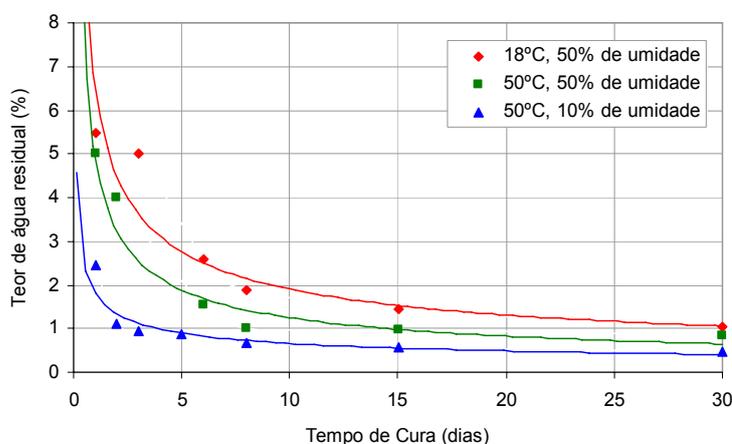


Figura 2.7 – Evolução do teor de água residual em função do tempo de maturação (Adaptado de ECKMANN *et al.*, 2002).

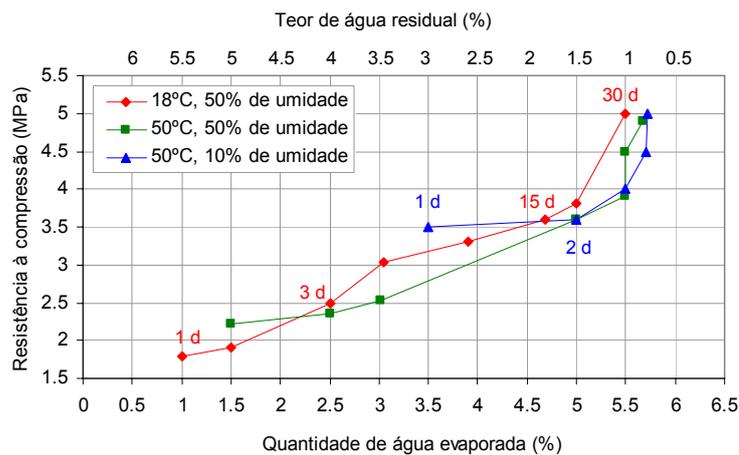


Figura 2.8 – Resistência a compressão em função da quantidade de água evaporada (Adaptado de ECKMANN *et al.*, 2002).

Segundo Eckmann *et al.* (2002), a saída de água ocorre de dois modos. O primeiro ocorre quando a cinética de evaporação é muito rápida, entre 3 a 10 dias de acordo com as condições de conservação, e o aumento da coesão (medida pela resistência a compressão) é diretamente dependente da evaporação da água. O segundo corresponde aos teores de água relativamente baixos (na ordem de 1%) e os resultados põem em evidência que, quaisquer que sejam as condições de temperatura e higrometria, é extremamente difícil, ou mesmo impossível, eliminar totalmente a água. Os autores constataram que, no caso de uma evaporação rápida (50°C de temperatura e 10% de umidade relativa), havia um crescimento da resistência à compressão a um teor de água residual constante, ou seja, o aumento da coesão dos corpos-de-prova não dependia então mais unicamente da evaporação da água. A aplicação de um déficit de umidade revelou-se muito mais eficaz que o aumento da temperatura. Por isso que à 50°C de temperatura e 10% de umidade relativa, o teor de água estabilizou-se após três dias de cura, sendo suficiente somente cinco dias para atingir a resistência à compressão obtida por um corpo-de-prova com 30 dias de cura nas condições de 18°C de temperatura e 50% de umidade relativa.

Poirier *et al.* (2002a), pesquisaram várias condições de conservação para uma mistura tipo *grave-émulsion* (GE 0/14). Moldaram corpos-de-prova pelo método Duriez visando um grau de compactação de 85% e os mantiveram conservados em recinto não ventilado a uma temperatura de 30°C, sem a medição da umidade relativa. Houve uma perda de água muito rápida. Com 7 dias, o teor de água dos corpos-de-prova foi inferior a 1%, e após 14 dias praticamente não evoluiu. Contudo, embora o teor de água permaneça constante, a resistência

prossegue evoluindo. Isto foi comprovado pelo aumento da resistência à compressão simples em aproximadamente 20% entre amostras com 14 e 90 dias (Figura 2.9).

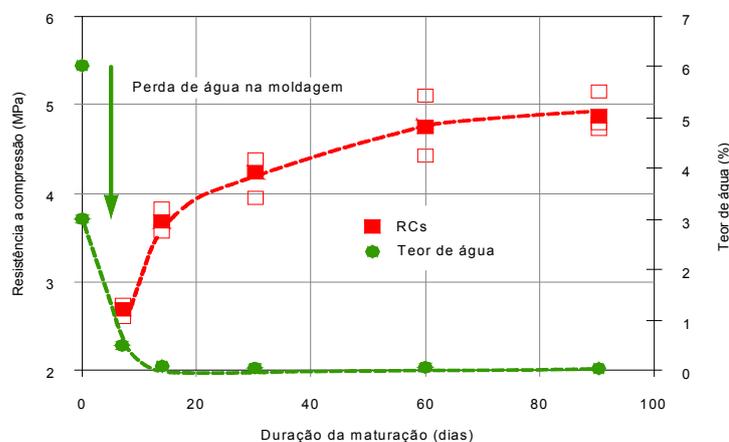


Figura 2.9 – Evolução da resistência à compressão e da quantidade de água evaporada em função do tempo de maturação (Adaptado de POIRIER *et al.*, 2002a).

Os autores avaliaram a evolução do teor de água residual das amostras Duriez em função do tempo para outras condições de cura (temperatura de 50°C com 15% de umidade relativa e temperatura de 35°C com 50% de umidade relativa), conforme mostra a Figura 2.10. O aumento da temperatura em conjunto com a umidade relativa baixa acelerou a saída de água, fazendo com que a maior parte da água seja eliminada majoritariamente durante as primeiras 48 horas. A 50°C e 15% de umidade relativa, o teor de água residual foi de apenas 0,1%, e este nível só foi atingido na condição de 35°C e 50% de umidade relativa em apenas cinco dias. Concluíram que, a condição de 50°C e 15%, foi demasiadamente severa, pois nas placas moldadas para o ensaio de deformação permanente e mantidas nesta condições, foram observadas fissuras na superfície, o que nunca foi constatado em pistas.

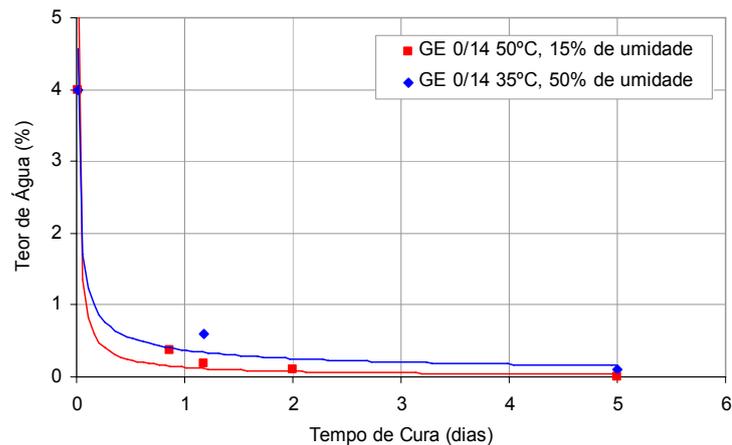


Figura 2.10 – Evolução da perda de água em amostras Duriez em função do tempo de cura (Adaptado de POIRIER *et al.*, 2002a).

Poirier *et al.* (2002a) também avaliaram a evolução do teor de água residual em amostras cilíndricas (altura = 80mm, diâmetro = 150 mm) moldadas com o compactador *Gyropac*, e conservadas a 5 e 18 °C e a 50% de umidade relativa. Conforme observado na Figura 2.11, novamente, encontra-se a tendência geral de uma perda inicial de água muito rápida. Os autores avaliaram a evolução do valor do módulo em função do teor de água em amostras do mesmo tipo moldadas com grau de compactação de 88%, para diferentes tempos de conservação (5, 18 e 35°C). O teor de água elevado inibiu o aumento da coesão, diminuindo os valores de módulo, ou seja, para teores de água superiores a 2,5%, os valores de módulo de resiliência a 10°C foram inferiores a 1000 MPa. Na Figura 2.12 também pode ser observado que, para amostras com teores reduzidos e aumento da temperatura de conservação, houve uma melhora nos valores dos módulos, o que pode ser relacionado a uma melhor homogeneidade do filme de asfalto formado.

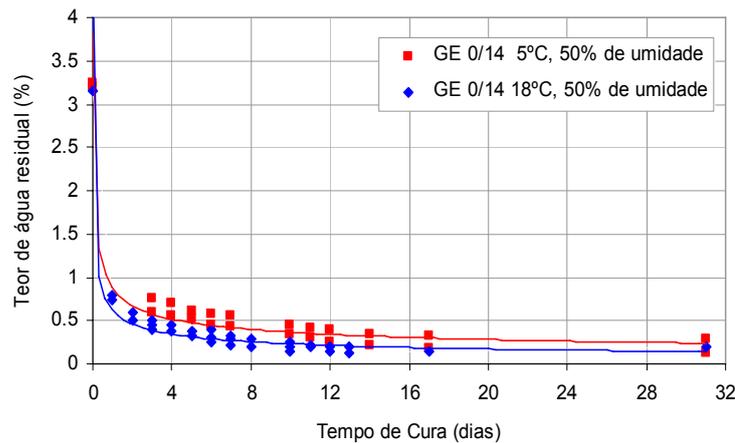


Figura 2.11 – Evolução da perda de água em amostras *Gyropac*.
(Adaptado de POIRIER *et al.*, 2002a).

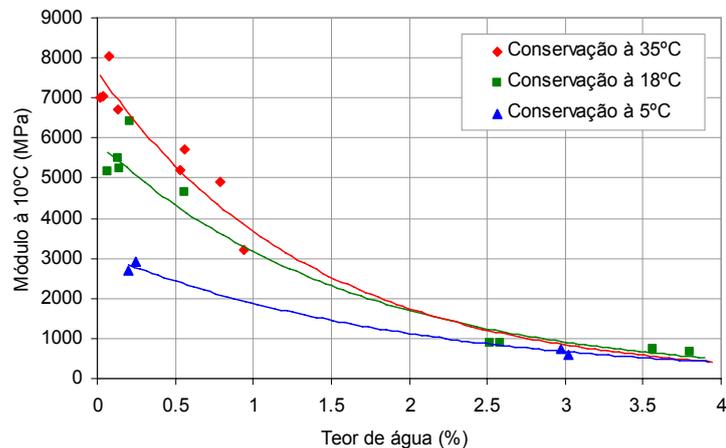


Figura 2.12 – Influência do teor de água sobre o módulo resiliente
(Adaptado de POIRIER *et al.*, 2002a).

No entanto, a eliminação rápida da água contida nos corpos-de-prova não é um objetivo a ser atingido o mais depressa possível, pois os acompanhamentos de obras apresentam quase sempre um teor de água residual entorno de 1%. No caso de uma rodovia francesa (RN 21), levantamentos mostraram que, após 2 meses sobre tráfego, uma mistura tipo *grave-émulsion* apresentou um teor de água residual compreendido entre 0,8 e 2%. Além disso, quando as condições de cura são demasiadamente severas, constata-se fissuras, principalmente em placas moldadas para o ensaio de deformação permanente. (POIRIER *et al.*, 2002a).

Bense *et al.* (2002) avaliaram o afundamento em trilha de roda – ATR para uma mistura de *grave-émulsion* GE 0/14 com diferentes tempos de cura. O ensaio desenvolveu-se em conformidade as condições praticadas com as misturas a quente. Foram ensaiadas placas com

períodos de cura de 21 dias e 80 dias à temperatura de 35°C e de 5 dias à temperatura de 50°C. Os teores de vazios médios das placas e as curvas de evolução da profundidade do ATR estão apresentadas na Figura 2.13.

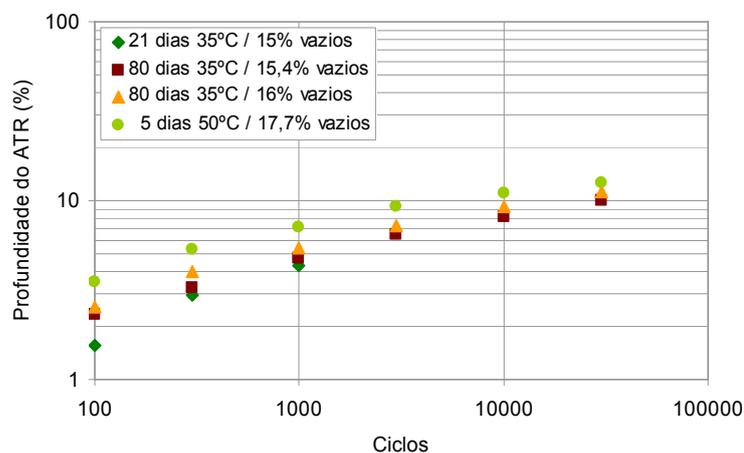


Figura 2.13 Evolução do ATR com diferentes tempos de cura (Adaptado de BENSE *et al.*, 2002).

Os autores observaram que a placa conservada na condição mais severa (5 dias à temperatura de 50°C) apresenta algumas fissuras na superfície ao fim do processo de cura. O ATR mais pronunciado ocorreu na placa conservada à temperatura de 50°C; explica-se este fato por um teor de vazios superior de 1,7 a 2,7 pontos em relação às três placas conservadas à temperatura de 35°C. Constata-se sobretudo que o tempo de cura prolongado não traz vantagens em relação ao ATR. Entretanto, nas quatro placas ensaiadas e apesar dos teores de vazios medidos, os desempenhos são satisfatórios porque aproximam-se das especificações exigidas de misturas a quente de classes 2 e 3 (ATR inferior a 10% a 10000 ciclos).

Bense *et al.* (2002) também efetuaram ensaios de ATR sobre uma mistura tipo *grave-émulsion* GE 0/14 com 4,2% de ligante residual 70/100. A mistura foi mantida sobre condicionamento durante 14 dias à temperatura de 35°C e o grau de compactação foi de 80,9%, à temperatura do ensaio foi fixada em 40°C. A título de comparação, os autores relacionaram juntamente na Figura 2.14 as profundidades de ATR de uma mistura a quente de *grave bitume* GB 0/14 classe 2 com 4% de asfalto 35/50 com grau de compactação de 91,7%.

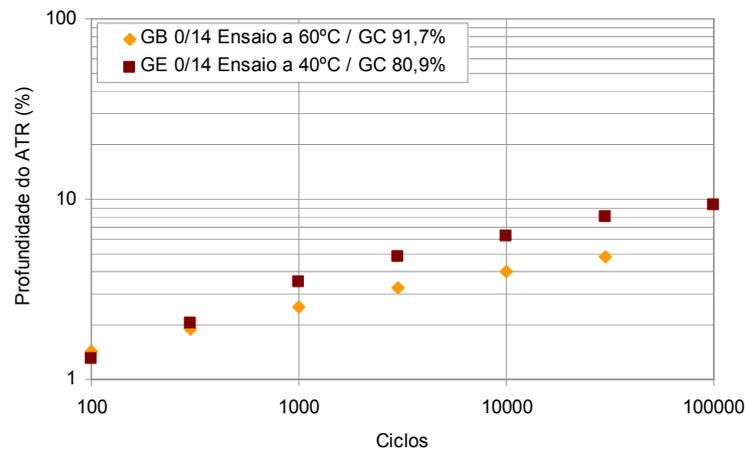


Figura 2.14 Comparativo da evolução do ATR entre grave-émulsion e grave bitume (Adaptado de BENSE *et al.*, 2002).

Os resultados não são diretamente comparáveis devido às curvas granulométricas das duas misturas serem um pouco diferentes e à diferença de temperatura entre os dois ensaios. Contudo os autores observaram, que após 100.000 ciclos, a profundidade do ATR medido sobre a *grave-émulsion* continua a ser inferior a 10% a temperatura de 40°C, e isto sobre uma placa com alto teor de vazios. Estes resultados mostram que os ensaios podem ser praticados à temperatura de 60°C em misturas a frio.

Bense *et al.* (2002) comentam a importância em comparar resultados de laboratório e o comportamento em campo. Dispondo de resultados de pista com considerável tempo de serviço, pode-se esclarecer um pouco mais os resultados de laboratório. A Tabela 2.11 apresenta uma comparação entre uma mistura tipo *grave-émulsion* 0/14, observando o comportamento em campo e os resultados de laboratório.

Tabela 2.5 – Comparativo entre resultados de ATR em laboratório e em pista de uma mistura de *grave-émulsion* (Adaptado de BENSE *et al.*, 2002).

Tipo	Itinerário – data	Comportamento	Resultados de laboratório
Grave-émulsion	Realização LCPC 1995	ATR unicamente na camada de suporte	Placa 10 cm
	2 milhões de ciclos c/ eixo 130 kN		ATR 30000 ciclos 60°C: 11%
	RN* 126 – 1997 T2** : 150-300	Sem ATR	Placa 10 cm ATR 30000 ciclos 60°C: 11%

Nota: * rodovia francesa; ** classe do tráfego: número médio diário de veículo pesado por faixa.

Estas observações mostram o bom comportamento das *graves-émulsion* em relação ao ATR. Estes resultados também fornecem indicações preciosas sobre os desempenhos medidos em laboratório e as previsões do comportamento que se pode esperar em campo. Os valores

obtidos em laboratório que podem parecer elevados, com um ATR superior a 10% a 10.000 ou 30.000 ciclos, não são encontrados em pista. Os estudos demonstram efetivamente, tanto em laboratório como em campo, que as misturas tipo *grave-émulsion* resistem bem ao ATR. No entanto, não terá um comportamento de um revestimento a quente devido a algumas diferenças como teor de vazios, dimensão, distribuição.

Segundo Dierkens (2005), as misturas a frio alcançam desempenhos mecânicos ótimos apenas após a colocação em serviço, já que a passagem dos veículos aumenta a compactação do material. Bense *et al.* (2002) mostraram que a *grave-émulsion* tem seu grau de compactação aumentado de 78,7% para 81,9% após 60 horas de circulação e o teor de água caiu de 4,5 para 3,1%. Este aumento do grau de compactação melhora sensivelmente o desempenho do material.

Segundo Carvalho Filho e Bordes (2003), somente com o passar do tempo e sob o efeito do tráfego, a água residual e as partículas de asfalto atingem uma coalescência progressiva, conduzindo a um comportamento próximo de um CBUQ. Esta evolução progressiva de propriedades tais como o módulo e a resistência a compressão, faz da *grave-émulsion* um material privilegiado para recapeamento ou reforço de estruturas flexíveis com altas deflexões.

Para demonstrar a evolução progressiva das propriedades das misturas asfálticas tipo *grave-émulsion*, Carvalho Filho e Bordes (2003) apresentam na Tabela 2.6 o acompanhamento de algumas aplicações deste tipo de mistura durante vários anos. Isto permite melhor apreciar o comportamento *in loco* do material e acompanhar a evolução de suas características.

Tabela 2.6 – Análise de alguns trechos de *grave-émulsion* em rodovias francesas (CARVALHO FILHO E BORDES, 2003).

Rodovias	RD 988	RD 994	RN 117	RD 999	RN 5	RN 205
Tipo de Tráfego*	T2 150-300	T3 50-150	T0 750-2000	T1 300-750	T2 150-300	T1 300-750
Idade (anos)	12	3	7	4	12	11
Espessura (cm)	10,5	11,6	10,4	9,7	12	13
Composição % passando						
0,08 mm	3,4	10,1	7,6	6,9	6,4	7,3
0,5 mm	16,8	19,1	15,3	13,6	15,9	16,4
2,0 mm	33,9	36,2	31,2	30,0	36,1	34,8
6,3 mm	55,4	66,3	55,7	55,1	77,9	36,7
Ligante (% asfalto residual)	4,1	4,3	4,07	4,03	3,5	4,7
Compactação inicial	86	88	85,1	84,9		
Compactação após N anos	90,7	90,3	88,07	85,7	85,8	91
Módulo (MPa) 10°C 0,02s	4400	5200	4200	4400	3400	7800
Módulo calculado (Ábaco Shell)	3500	4300	4400	5100	4800	6850

Nota: * classe do tráfego: número médio diário de veículo pesado por faixa.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta as características dos agregados, da emulsão asfáltica e das misturas tipo *grave-émulsion*, bem como os métodos e procedimentos laboratoriais empregados na caracterização do comportamento destas misturas com diferentes tempos de estocagem.

3.1 Agregados

Os agregados escolhidos para serem empregados nesta pesquisa foram de natureza mineral granítica, proveniente da Empresa Eldorado Mineração, situada na Estrada Monte Alegre, km 4,4 em Eldorado do Sul, no estado do Rio Grande do Sul. Os materiais britados foram coletados em diversos pontos da pilha de modo a obter-se uma amostra representativa do material, conforme a norma DNER PRO 120/97.

Foram utilizadas cinco frações de agregados incluindo o material de enchimento: brita 1 (19 mm), brita 0 (9,5 mm), pó de pedra (4,8 mm), areia branca de duna e filer (pó calcário). Na Tabela 3.1 e na Figura 3.1 estão os resultados da análise granulométrica destes materiais.

Tabela 3.1 – Análise granulométrica dos agregados e filer.

Peneiras		Granulometria (% em peso, passando) DNER ME 083/98				
		Brita 1 (19,0mm)	Brita 0 (9,5mm)	Pó de Pedra (4,8mm)	Areia Branca de duna	Fíler Pó calcário
(pol.)	(mm)					
3/4"	19	100,00	-	-	-	-
1/2"	12,7	43,10	-	-	-	-
3/8"	9,50	13,30	100,00	100,00	-	-
nº4	4,8	1,10	5,40	91,70	-	-
nº10	2,0	1,00	0,90	60,50	100,00	-
nº40	0,42	0,90	0,60	25,70	98,85	100,00
nº80	0,18	0,70	0,60	16,00	49,94	98,26
nº200	0,075	0,20	0,60	10,10	0,75	81,56

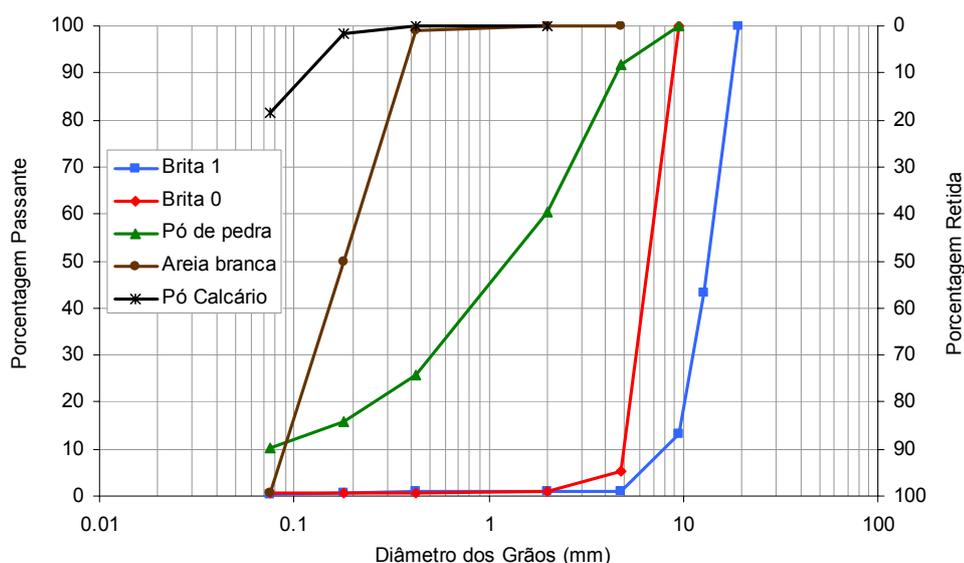


Figura 3.1 – Curvas granulométricas dos agregados empregados

Alguns ensaios físicos e mecânicos foram realizados de forma a garantir a caracterização dos agregados. Na Tabela 3.2 estão apresentados os valores encontrados e suas respectivas normas.

Tabela 3.2 – Características dos agregados minerais.

Ensaio Realizado	Agregado Mineral		
	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra
Massa Específica Real (kN/m ³)	DNER ME 081/98 27,02	DNER ME 081/98 27,24	DNER ME 084/95 27,04
Massa Específica Aparente (kN/m ³)	DNER ME 081/98 25,79	DNER ME 081/98 26,58	DNER ME 084/95 26,47
Absorção (%)	DNER ME 081/98 0,55	DNER ME 081/98 0,59	-
Abrasão Los Angeles (%)	DNER ME 035/98 24,6	DNER ME 035/98 30,3	-
Índice de Lamelaridade (%)	DAER EL 108/01 25,3	DAER EL 108/01 33,1	-
Equivalente de areia (%)	-	-	DNER ME 054/97 69,7

O filer (pó calcário) utilizado chamado comercialmente de Calcário Dolomítico faixa C (Empresa Dagoberto Barcellos), apresentou massa específica real de 27,97 kN/m³. A areia branca de duna, também fornecida pela Empresa Eldorado Mineração apresentou massa específica real dos grãos de 26,26 kN/m³ (DNER ME 085/94).

3.2 Emulsão asfáltica

A emulsão utilizada foi fornecida pela Ipiranga Asfaltos S/A proveniente da refinaria localizada na cidade de Paulínia, no estado de São Paulo. Trata-se de uma emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta RL-1C.

Para caracterização da emulsão asfáltica foram realizados ensaios laboratoriais de consistência, composição e estabilidade. A Tabela 3.3 apresenta os resultados, onde observa-se que a emulsão asfáltica catiônica RL-1C atende a todas as recomendações normativas, sendo possível a utilização deste material no estudo.

Tabela 3.3 – Ensaio de Caracterização da emulsão asfáltica RL-1C.

Ensaio	Normas	Especificações	Resultados
Viscosidade Saybol Furol a 25°C (Ssf)*	NBR 14491	máximo 70	23
Sedimentação, 5 dias (% em peso)	NBR 6570	máximo 5	0,53
Peneiração (% em peso)	NBR 14393	máximo 0,1	< 0,1
Carga da Partícula*	NBR 6567	Positiva	Positiva
Resíduo por Evaporação (% em peso)	NBR 14376	mínimo 60	61,80
pH,	NBR 6299	máximo 6,5	2,50
Adesividade (% recoberta)	NBR 6300	-	90%

Nota: * valores fornecidos pelo CDT da Ipiranga Asfaltos.

3.3 Misturas asfálticas tipo *grave-émulsion*

3.3.1 Escolha das curvas granulométricas

As curvas granulométricas para as misturas asfálticas tipo *grave émulsion* foram adotadas a partir da Norma Francesa NF P 98-121 (AFNOR, 1993). Trabalhou-se com as misturas do Tipo 1 (0/10) apropriadas para conservação, reperfilagem e reparos localizados e do Tipo 3 (0/14) utilizada preferencialmente em camadas de base. A Tabela 3.4 apresenta os valores recomendados pela norma.

Tabela 3.4 – Distribuições granulométricas estipuladas pela Norma Francesa NF P 98-121(AFNOR 1993).

Abertura das Peneiras (mm)	Grave-émulsion Tipo 1 (0/10)	Grave-émulsion Tipo 3 (0/14)
20	-	-
14	-	95
10	95	-
6,3	60	58
2,0	40	36
0,5	19	18
0,08	7	7

Para as misturas em estudo, a concepção do projeto seguiu duas premissas: reproduzir curvas granulométricas com valores idênticos aos sugeridos pela Norma Francesa (NF P 98-121), e elaborar curvas granulométricas que mais se assemelhassem aos valores da Norma Francesa (NF P 98-121), no entanto, considerando as granulometrias dos agregados disponíveis e a utilização de material de enchimento. A Tabela 3.5 apresenta a nomenclatura adotada para cada uma das misturas.

Tabela 3.5 – Nomenclatura das misturas tipo *grave-émulsion*.

Classe das Misturas	Nomenclatura utilizada	
	Curvas segundo a norma NF P 98-121	Curvas elaboradas no estudo
Tipo 1	GE 0/10 NF	GE 0/10 Adaptada
Tipo 3	GE 0/14 NF	GE 0/14 Adaptada

Nas curvas granulométricas Adaptadas, utilizou-se nas composições areia branca de duna e pó calcário. As Tabelas 3.6 e 3.7 apresentam as granulometrias dos agregados, os percentuais em cada fração e as curvas granulométricas das misturas adaptadas. As curvas granulométricas Norma Francesa não terão seus percentuais apresentados, devido à não consideração das características granulométricas dos agregados.

Tabela 3.6 – Distribuição do percentual dos agregados para composição granulométrica da mistura GE 0/10 Adaptada.

% passante #		Brita 1		Brita 0		Pó de Pedra		Areia branca		Pó calcário		Curva 0/10
(pol.)	(mm)	Gran. ¹	Perc. ²									
3/4"	19	100,00	5,00	100,00	30,00	100,00	63,00	100,00	1,00	100,00	1,00	100,0
1/2"	12,7	43,1	2,16	100,00	30,00	100,00	63,00	100,00	1,00	100,00	1,00	97,2
3/8"	9,5	13,3	0,67	100,00	30,00	100,00	63,00	100,00	1,00	100,00	1,00	95,7
nº4	4,8	1,10	0,06	5,40	1,62	91,70	57,77	100,00	1,00	100,00	1,00	61,4
nº10	2,0	1,00	0,05	0,90	0,27	60,50	38,12	100,00	1,00	100,00	1,00	40,4
nº40	0,42	0,90	0,05	0,60	0,18	25,70	16,19	98,85	0,99	100,00	1,00	18,4
nº80	0,18	0,70	0,04	0,60	0,18	16,00	10,08	49,94	0,50	98,26	0,98	11,8
nº200	0,075	0,20	0,01	0,60	0,18	10,10	6,36	0,75	0,01	81,56	0,82	7,4

Nota: ¹ granulometria de cada fração; ² percentual da fração em cada peneira.

Tabela 3.7 – Distribuição do percentual dos agregados para composição granulométrica da mistura GE 0/14 Adaptada.

% passante #		Brita 1		Brita 0		Pó de Pedra		Areia		Pó calcário		Curva 0/14
(pol.)	(mm)	Gran. ¹	Perc. ²									
3/4"	19	100,00	15,00	100,00	27,00	100,00	55,00	100,00	2,00	100,00	1,00	100,0
1/2"	12,7	43,1	6,47	100,00	27,00	100,00	55,00	100,00	2,00	100,00	1,00	91,5
3/8"	9,5	13,3	2,00	100,00	27,00	100,00	55,00	100,00	2,00	100,00	1,00	87,0
nº4	4,8	1,10	0,17	5,40	1,46	91,70	50,44	100,00	2,00	100,00	1,00	55,1
nº10	2,0	1,00	0,15	0,90	0,24	60,50	33,28	100,00	2,00	100,00	1,00	36,7
nº40	0,42	0,90	0,14	0,60	0,16	25,70	14,14	98,85	1,98	100,00	1,00	17,4
nº80	0,18	0,70	0,11	0,60	0,16	16,00	8,80	49,94	1,00	98,26	0,98	11,0
nº200	0,075	0,20	0,03	0,60	0,16	10,10	5,56	0,75	0,02	81,56	0,82	6,6

Nota: ¹ granulometria de cada fração; ² percentual da fração em cada peneira.

A Tabela 3.8 apresenta os percentuais passantes das curvas granulométricas das quatro misturas asfálticas tipo *grave-émulsion* utilizadas no estudo. Também é apresentada a Faixa E para pré-misturados a frio do DER/PR – ES–P 23/05.

Tabela 3.8 – Composições granulométricas das misturas tipo *grave-émulsion* estudadas.

% passante #		GE 0/10 Adaptada	GE 0/10 NF	GE 0/14 Adaptada	GE 0/14 NF	DER/PR - ES-P23/5	
(pol.)	(mm)					Inferior	Superior
3/4"	19	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100
1/2"	12,7	97,2	98,5	91,5	92,7	85	100
3/8"	9,5	95,7	91,5	87,0	84,0	70	97
nº4	4,8	61,4	55,0	55,1	52,6	30	65
nº10	2,0	40,4	40,0	36,7	36,0	-	-
nº40	0,42	18,4	17,8	17,4	17,0	20	45
nº80	0,18	11,8	12,3	11,0	11,9	-	-
nº200	0,075	7,4	6,6	6,6	6,6	2	8

As Figuras 3.2 a 3.5 apresentam as curvas granulométricas das quatro misturas asfálticas tipo *grave-émulsion* utilizados no estudo. Em cada Figura está apresentada a curva granulométrica de trabalho, a curva granulométrica estipulada pela Norma Francesa NF P 98-121 e para efeito de comparação também é apresentada a Faixa E para pré-misturados a frio do DER/PR – ES-P 23/05.

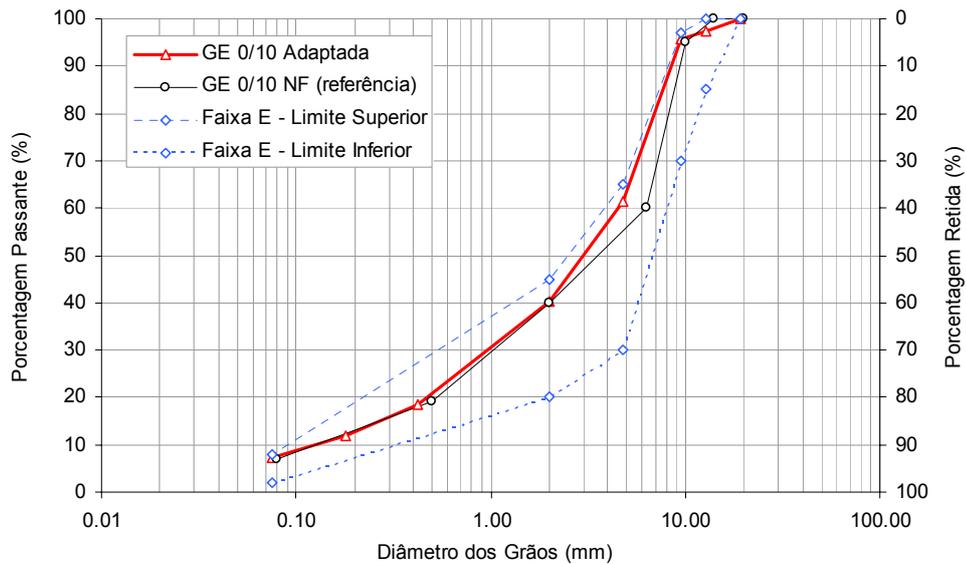


Figura 3.2 – Curvas granulométricas GE 0/10 Adaptada, de referência e faixa E do DER/PR – ES-P 23/05.

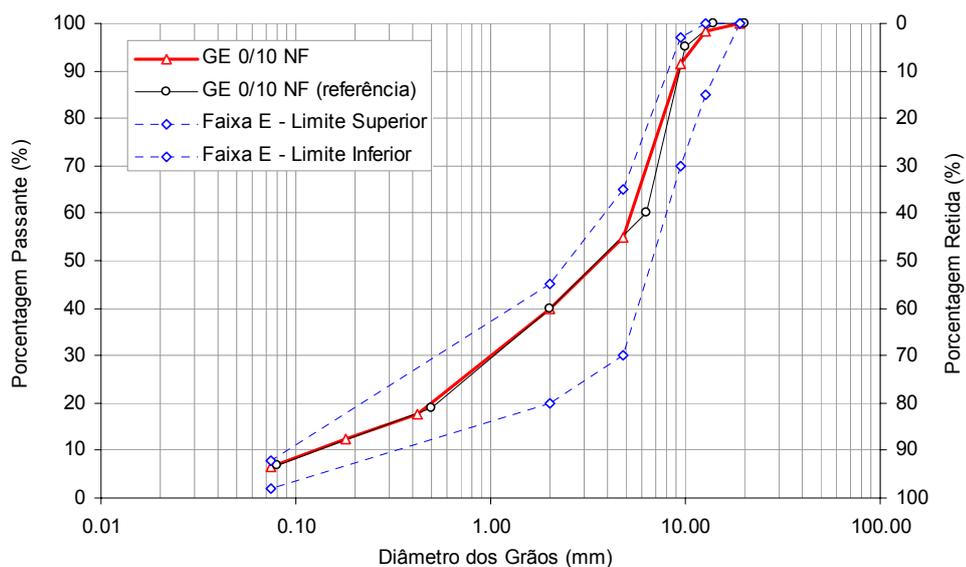


Figura 3.3– Curvas granulométricas GE 0/10 NF, de referência e faixa E do DER/PR – ES-P 23/05.

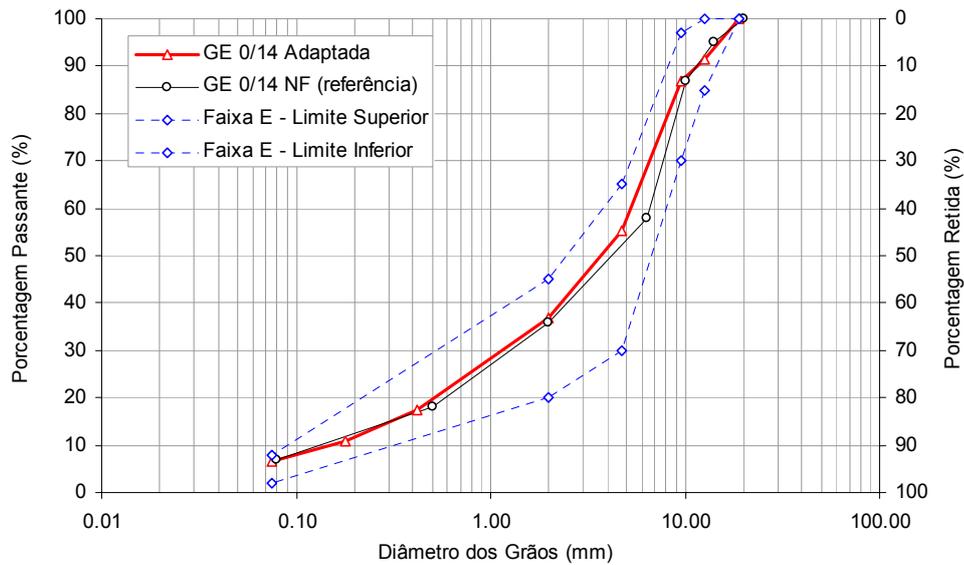


Figura 3.4 – Curvas granulométricas GE 0/14 Adaptada, de referência e faixa E do DER/PR – ES-P 23/05.

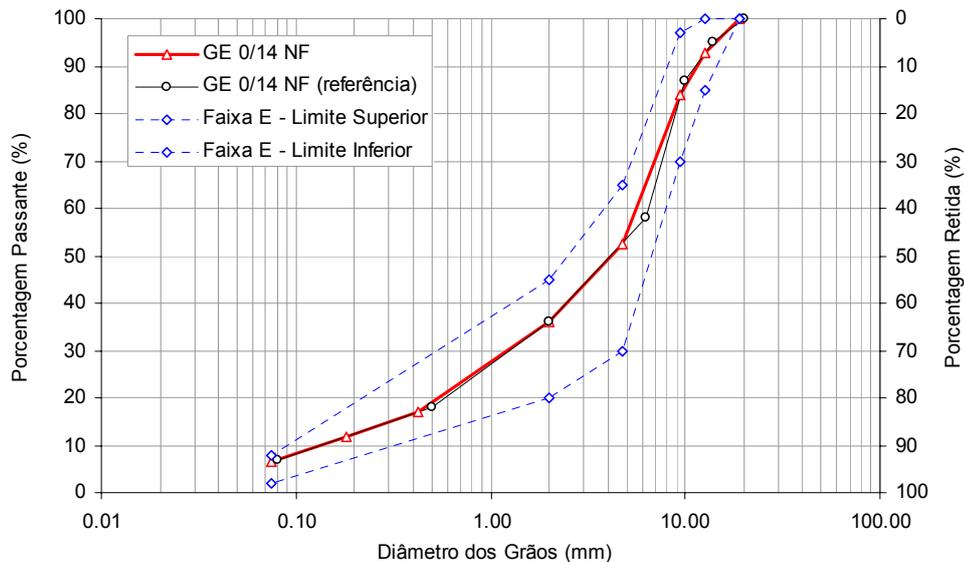


Figura 3.5 – Curvas granulométricas GE 0/14 NF, de referência e faixa E do DER/PR – ES-P 23/05.

3.3.2 Teor de emulsão asfáltica

Os teores de emulsão utilizados nas misturas de *grave-émulsion*, assim como as curvas granulométricas, também seguiram as diretrizes da Norma Francesa (NF P 98-121). Conforme apresentado na Tabela 3.9, os teores de ligante residual recomendados são de 4,2% para as misturas do Tipo 1 – GE 0/10 e de 3,8% para as misturas do Tipo 3 – GE 0/14, os quais

correspondem a teores de 6,8% e 6,15% de emulsão respectivamente, já que a emulsão asfáltica utilizada possui um teor residual de asfalto de 61,80%.

Antes de cada moldagem as emulsões foram agitadas durante alguns minutos para evitar a segregação de material sólido no fundo das latas. Para facilitar a dosagem, a quantidade de emulsões necessária era retirada das latas e colocada em embalagens plásticas.

Tabela 3.9 – Teores de emulsões utilizados nas misturas.

Misturas Asfálticas	Teor de Emulsão Asfáltica (%)	Teor de Ligante Residual (%)
Grave-émulsion (0/10) NF	6,80	4,20
Grave-émulsion (0/10) Adaptada	6,80	4,20
Grave-émulsion (0/14) NF	6,15	3,80
Grave-émulsion (0/14) Adaptada	6,15	3,80

3.3.3 Teor da água de molhagem

A partir de alguns estudos (Godard, 1991; Santana, 1993; Thouret *et al.*, 1998; Triquigneaux e Brosseaud, 2002; Eckmann *et al.*, 2002) foram realizadas algumas misturas com teores de água de 3%, 5% e 7%. Julgou-se mais adequado trabalhar com o teor de molhagem igual a 5%, tendo em vista que o teor de 3% não proporcionou uma molhagem completa de todos os agregados e o teor de 7%, após a adição da emulsão asfáltica, deixou a mistura com uma consistência muito fluida ou dita de “sopa”.

3.3.4 Determinação da umidade de compactação

Um fator preponderante nas misturas com emulsão asfáltica é o teor de umidade na compactação. A umidade total da mistura é formada com a soma dos teores da água de molhagem, a água contida na emulsão e a água contida no agregado, que neste caso foi considerada como igual a zero, pois os agregados foram submetidos a uma secagem previa.

Para encontrar a umidade de compactação ideal foram moldados no total 56 corpos-de-prova com vários teores de umidade, com percentuais que ficaram compreendidos entre 29 e 82% da umidade total. As misturas testadas foram as GE 0/14 NF e GE 0/10 NF as quais continham inicialmente uma umidade total de 6,73% e 6,93%, respectivamente. A Tabela 3.10 apresenta os teores utilizados.

Tabela 3.10 – Teores de umidade de compactação.

Grave-émulsion – GE 0/14 NF		Grave-émulsion GE 0/10 NF	
Percentual da umidade total (%)	Teor da umidade de compactação (%)	Percentual da umidade total (%)	Teor da umidade de compactação (%)
29,91	2,01	29,02	2,01
39,01	2,62	39,18	2,71
49,42	3,33	49,21	3,41
59,43	4,00	60,25	4,17
70,09	4,72	71,02	4,92
81,02	5,45		

A escolha da umidade de compactação foi baseada nos resultados de resistência à tração, volume de vazios, massa específica aparente, estabilidade e fluência Marshall. Todos os ensaios foram realizados com 7 dias de cura após a compactação. As Figuras 3.6 a 3.10 apresentam os resultados encontrados.

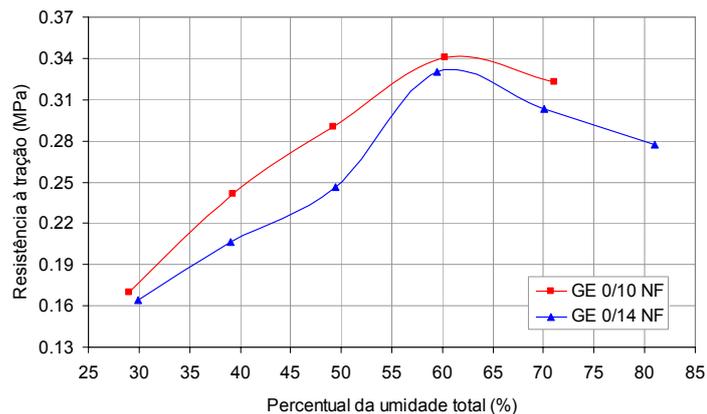


Figura 3.6 – Resistência a tração em função do percentual da umidade total.

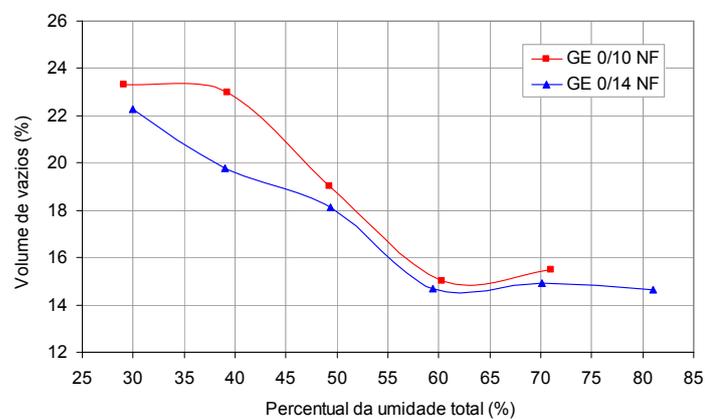


Figura 3.7 – Volume de vazios em função do percentual da umidade total.

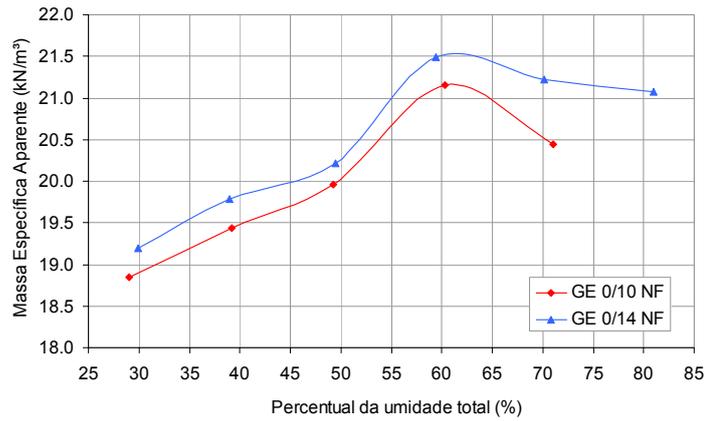


Figura 3.8 – Massa específica aparente em função do percentual da umidade total.

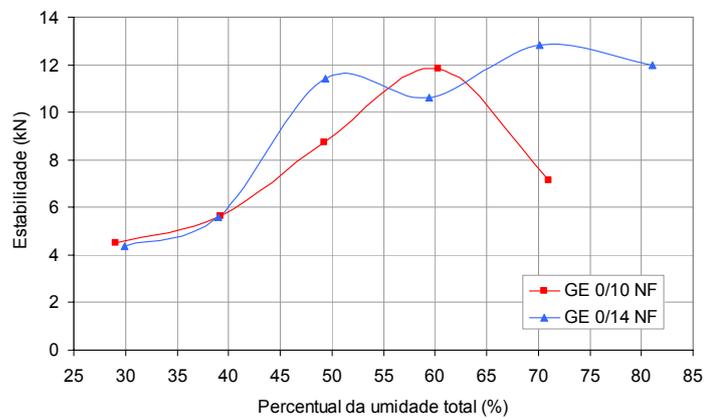


Figura 3.9 – Estabilidade Marshall em função do percentual da umidade total.

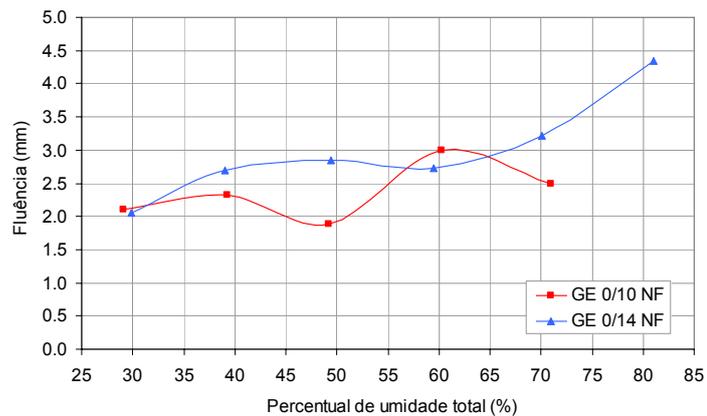


Figura 3.10 – Fluência Marshall em função do percentual da umidade total.

Com a variação na umidade de compactação pode-se observar que, para percentuais de umidade total inferiores a 55%, as misturas têm seus resultados prejudicados, sendo este prejuízo cada vez mais acentuado à medida que o percentual de umidade total diminui mais. No caso dos percentuais de umidade total superiores a 70%, os desempenhos também foram prejudicados, mas de maneira mais amena. Com teores elevados de umidade, a compactação foi dificultada de tal modo que a mistura GE 0/10 NF, com percentual de 80% de umidade total, não pode ser moldada.

Com exceção da estabilidade e fluência Marshall para a mistura GE 0/14 NF, os melhores resultados foram obtidos com um percentual de umidade total em torno de 60 a 65%, confirmando estudos realizados por Tuchumantel (1990), Santana (1993), Silva Júnior e Sória (2000) e Clerman (2004).

Desta maneira adotou-se como percentual da umidade total ideal o valor de 62%, o que significa um teor de umidade de compactação de 4,17% e 4,30% para as misturas GE 0/14 NF e GE 0/10 NF, respectivamente. Estes mesmos percentuais da umidade de compactação foram utilizados também para as misturas GE 0/14 Adaptada e GE 0/10 Adaptada.

3.3.5 Moldagem dos corpos-de-prova

O processo de moldagem das misturas asfálticas do tipo *grave-émulsion* foi conduzido seguindo alguns procedimentos do Método de Ensaio DNER–ME 107/94 (Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – método Marshall), tais como: pesar o agregado para a confecção de um corpo-de-prova de cada vez e a utilização do compactador mecânico para compactação, com aplicação de 75 golpes em cada face.

3.3.6 Preparação das misturas

Para a composição das misturas tipo *grave-émulsion*, os agregados foram adicionados na fração exata de material retido em cada peneira, para a confecção de 1 (um) corpo-de-prova de cada vez, em bandejas de alumínio conforme mostra a Figura 3.11a. A separação dos materiais para a confecção de apenas 1 (um) corpo-de-prova de cada vez, ajudou no controle mais preciso da umidade de compactação e garantiu uma maior homogeneidade entre os corpos-de-prova de uma mesma mistura.

Precedente à adição de água, foi executada uma mistura a seco, para homogeneizar o material granular, conforme mostra a Figura 3.11b. Na seqüência adicionou-se água, misturando cuidadosamente, para garantir uma molhagem completa de todos os agregados (Figura 3.11c). Em seguida adicionou-se a emulsão asfáltica até a obtenção de uma mistura visualmente homogênea, apresentada na Figura 3.11d. Todo o processo de mistura foi realizado manualmente. Bordes e Valéry (1997) comentam que a dispersão da emulsão deve ser feita numa duração mais curta que a mistura com água, para evitar riscos de remoção do revestimento e tornar a mistura muito fluida ou com aparência de “sopa”.



Figura 3.11 – Preparação da mistura: a) composição granulométrica; b) mistura a branco; c) mistura com água; d) mistura com emulsão.

3.3.7 Processo de cura antes da compactação

O processo de cura que precedeu a compactação foi realizado à temperatura ambiente com exposição à luz solar. As misturas ficavam expostas até que fosse atingido o percentual de 62% da umidade total para serem compactadas. A perda de umidade foi controlada através de pesagens sucessivas ao longo do tempo. O período de exposição médio foi de 60 minutos

com temperaturas em torno de 28 a 37°C. A Figura 3.12 apresenta as misturas no início e no final da cura antes da compactação.

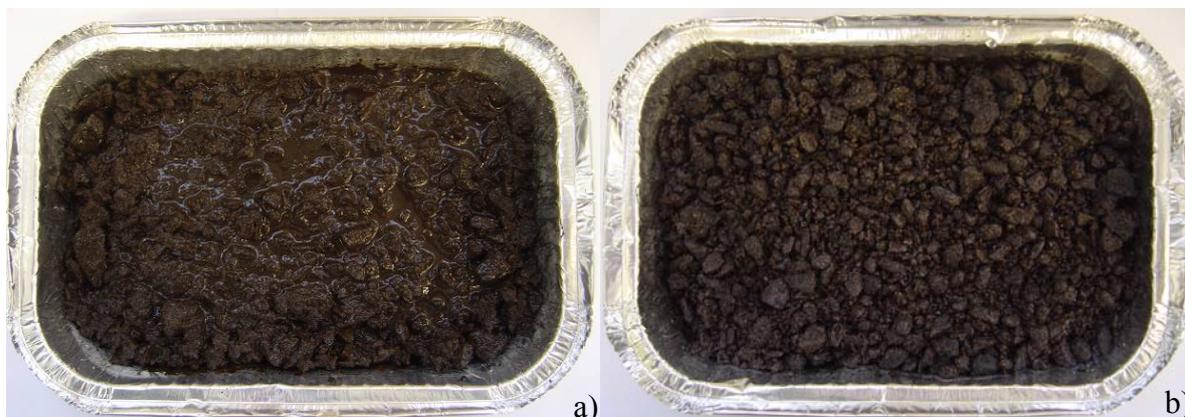


Figura 3.12 – Mistura em processo de cura antes da compactação: a) no início da cura e b) ao final da cura.

3.3.8 Processo de cura pós compactação

O processo de cura pós compactação seguiu os procedimentos propostos por Thanaya (2002a). Após a compactação, os corpos de prova foram colocados em estufa a 40°C por 48 horas, sendo as primeiras 24 horas com molde e as 24 horas restantes fora do molde, conforme apresentado na Figura 3.13.



Figura 3.13 – Processo de cura pós-compactação dos corpos-de-prova: a) 24 horas iniciais e b) 24 horas finais.

Ao término deste procedimento os corpos-de-prova foram armazenados em local não ventilado à temperatura ambiente, e ensaiados posteriormente com diferentes idades de cura. As dimensões dos corpos-de-prova, assim como a massa específica aparente (seguindo as

recomendações da norma DNER–ME 107/94 para amostras com volume de vazios superior a 10%), foram determinadas sete dias após a compactação.

3.3.9 Umidade das misturas

Com o intuito de verificar a evolução do teor de água residual das misturas tipo *grave-émulsion*, foram realizados pesagens de três corpos-de-prova de cada mistura sem tempo de estocagem, durante as etapas do processo de cura pós-compactação. Os valores apresentados na Tabela 3.11 indicam que mesmo utilizando um processo de cura sem controle da umidade relativa, após 48 horas, o procedimento adotando atingiu valores normalmente referenciados em estudos com este tipo de mistura.

Tabela 3.11 – Valores de estabilidade e fluência Marshall.

Grave-émulsion	Umidade da mistura na compactação (%)	Umidade da mistura após 24 horas em estufa (%)	Umidade da mistura após 48 horas em estufa (%)
GE 0/10 Adaptada	4,29	1,95	0,32
GE 0/10 NF	4,29	2,08	0,71
GE 0/14 Adaptada	4,20	2,22	0,74
GE 0/14 NF	4,19	2,28	0,81

3.3.10 Estocagem das misturas

A possibilidade de adiar a utilização das misturas asfálticas tipo *grave-émulsion* após sua fabricação é uma de suas principais vantagens. Com o intuito de verificar esta característica em laboratório, as misturas tiveram o processo de compactação adiado. Assim, os corpos-de-prova foram preparados com três tempos de estocagem antes da compactação.

Sem estocagem (zero dia): processos de mistura e compactação no mesmo dia;

Com estocagem (14 dias): processo de compactação 14 dias após o processo de mistura;

Com estocagem (28 dias): processo de compactação 28 dias após o processo de mistura.

As misturas sem tempo de estocagem tiveram as etapas (preparação da mistura, cura antes da compactação e compactação) realizadas no mesmo dia; diferentemente as misturas com tempo de estocagem (14 e 28 dias), que tiveram o processo de compactação adiado; ou seja, após o processo de ruptura da emulsão e perda de umidade para atingir o teor ideal de

umidade de compactação estas misturas foram estocadas em recipientes fechados e armazenadas conforme representado na Figura 3.14. O fechamento dos recipientes foi necessário para evitar uma perda demasiada de umidade das misturas, quando expostas ao ar, devido à pequena quantidade de material armazenado, dificultando sua trabalhabilidade e consequentemente, impossibilitando sua utilização.

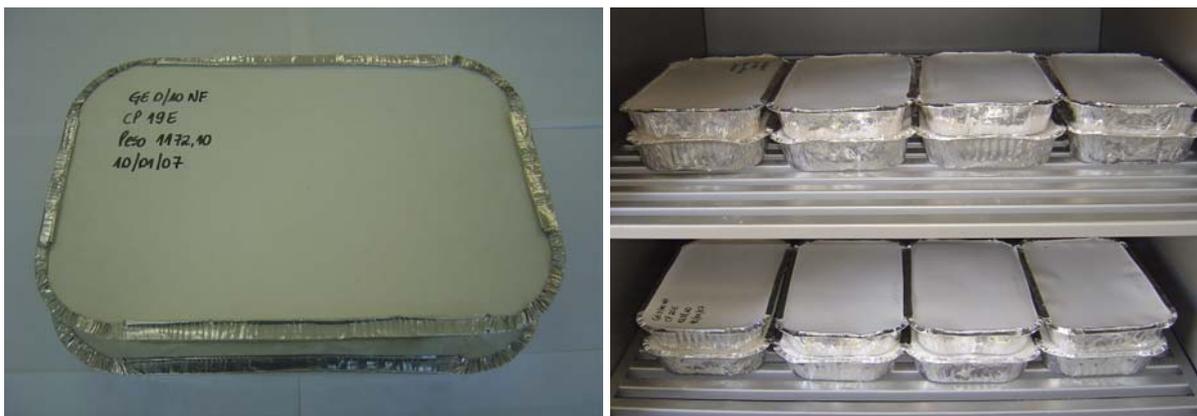


Figura 3.14 – Processo de estocagem das misturas.

Após o período de estocagem foi realizada a correção de umidade das misturas, para ajudar na trabalhabilidade da mistura e para que a compactação fosse realizada com a umidade de compactação pré-determinada. Os demais procedimentos (compactação, cura pós compactação e armazenagem) foram realizados igualmente às demais misturas sem tempo de estocagem antes da compactação. A Tabela 3.11 apresenta os percentuais de umidade das misturas antes e após a estocagem, e no momento da compactação. As misturas com 28 dias de estocagem tiveram um percentual de umidade perdida maior, e com exceção da mistura GE 0/14 Adaptada com 14 dias de estocagem, as misturas Adaptadas em todas as situações tiveram um percentual de umidade perdida inferior que os correspondentes às misturas NF.

Tabela 3.11 – Evolução dos percentuais da umidade de compactação nas misturas com tempo de estocagem.

Grave-émulsion	Tempo de estocagem (dias)	Umidade na estocagem (%)	Umidade após a estocagem (%)	Umidade perdida (%)	Umidade de compactação (%)
GE 0/10	14	61,01	54,11	6,90	62,27
Adaptada	28	62,29	50,75	11,54	62,68
GE 0/10 NF	14	61,84	54,73	7,11	62,22
	28	60,81	44,65	16,16	62,07
GE 0/14	14	62,32	53,26	9,06	62,33
Adaptada	28	62,79	50,08	12,71	62,64
GE 0/14 NF	14	62,11	54,39	7,72	62,76
	28	62,04	44,38	17,66	62,53

3.4 Ensaios realizados nas misturas tipo *grave-émulsion*

Para avaliar o comportamento das misturas asfálticas tipo *grave-émulsion* foram realizados ensaios de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência, *creep* dinâmico e ensaio Cantabro. A escolha dos ensaios foi baseada no critério de aplicabilidade a estas misturas e de disponibilidade de equipamentos no Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LAPAV). Na seqüência será realizada uma descrição sucinta dos métodos de ensaios utilizados na pesquisa para o estudo das misturas. A Tabela 3.12 apresenta os ensaios realizados nas quatro misturas nos três tempos de estocagem.

Tabela 3.12 – Experimentos realizados no estudo.

Ensaio Realizado	Misturas de Grave-émulsion				Tempo de Estocagem
Módulo de Resiliência a 25°C e 35°C	GE 0/10 NF	GE 0/10 Adaptada	GE 0/14 NF	GE 0/14 Adaptada	0, 14, 28 dias
Resistência à Tração a 25°C e 35°C					0, 14, 28 dias
<i>Creep</i> Dinâmico a 0,07MPa					0, 14, 28 dias
Estabilidade e Fluência Marshall					0, 14, 28 dias
Cantabro					0, 14, 28 dias

3.4.1 Estabilidade e fluência Marshall

A estabilidade e fluência Marshall são parâmetros obtidos em uma prensa com molde bipartido à compressão, aplicando-se uma carga diametral, após a permanência dos corpos-de-prova em estufa a 40°C por um período de 2 horas. A estabilidade é o valor da carga máxima suportada pelo corpo-de-prova e a fluência é a deformação sofrida no momento da ruptura. A Figura 3.15 apresenta uma prensa Marshall.

Para a determinação da estabilidade e fluência Marshall foram moldados e ensaiados três corpos-de-prova cilíndricos, para cada mistura estudada (GE 0/10 NF, GE 0/10 Adaptada, GE 0/14 NF, GE 0/14 Adaptada) com três tempos de estocagem (0,14 e 28 dias). A idade média dos corpos-de-prova ensaiados foi de 48 dias.



Figura 3.15 – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall

3.4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral – RT (tração indireta ou tração por compressão diametral) conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido pelo Professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para determinar a resistência à tração de corpos-de-prova de concreto de cimento Portland através de solicitações estáticas (MEDINA e MOTTA, 2005). É um ensaio de ruptura onde o corpo-de-prova cilíndrico é

posicionado horizontalmente e a carga é aplicada progressivamente, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s.

O procedimento do ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral (RT), baseado na DNER ME 138/94 envolve as seguintes etapas:

- Determinar a média da altura e do diâmetro do corpo-de-prova;
- Manter o corpo-de-prova na câmara de aquecimento ou sistema de refrigeração por um período de 2 horas, e obter a temperatura específica;
- Colocar o corpo-de-prova na posição horizontal sobre o prato inferior da prensa, recomenda-se interpor os dois frisos metálicos curvos ao longo das geratrizes de apoio superior e inferior;
- Ajustar os pratos da prensa, dando ligeira compressão que segure o corpo-de-prova em posição;
- Aplicar a carga progressivamente, à razão de $0,8\text{mm/s} \pm 0,1\text{mm/s}$, até que se dê a ruptura como separação das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical. Anota-se a carga da ruptura;
- Calcular a resistência à tração indireta segundo a Equação (2.1):

$$RT = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (3.1)$$

onde:

RT = Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = força aplicada (N);

d = diâmetro do corpo-de-prova (mm);

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

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral foram moldados e ensaiados três corpos-de-prova cilíndricos, de cada mistura estudada (GE 0/10 NF, GE 0/10 Adaptada, GE 0/14 NF, GE 0/14 Adaptada) nos três tempos de estocagem (0,14 e 28 dias). A cura pós compactação dos corpos-de-prova teve um tempo médio de 36 dias. O ensaio de resistência à tração foi realizado em duas temperaturas, a 25°C e 35°C.



Figura 3.16 – Prensa para o ensaio de resistência à tração na compressão diametral.

3.4.3 Ensaio de Módulo de Resiliência por compressão diametral

A deformabilidade dos materiais asfálticos é estudada a partir do módulo de resiliência – MR. Hveem (1955) *apud* Medina e Motta (2005), preferiu usar o termo deformação resiliente em vez de deformação elástica sob o argumento de que as deformações nos pavimentos são muito maiores do que nos sólidos elásticos com que lida o engenheiro (concreto, aço, etc.). Na verdade, o termo resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; corresponde à energia potencial de deformação.

Para Barksdale *et al.* (1997) *apud* Brito (2006), o módulo de resiliência (MR) é análogo ao módulo de elasticidade (E). Ambos os termos tem a mesma definição pela teoria da elasticidade, com a diferença que o MR é determinado a partir de um ensaio de cargas

repetidas. Valores de pico de tensão e deformação recuperável (resiliente) no ensaio são usados para calcular as constantes elásticas resilientes, ainda que o pico de tensão e o pico de deformação recuperável não ocorram ao mesmo tempo em um ensaio dinâmico deste tipo.

Segundo Medina e Motta (2005), os ensaios de carga repetida em que a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de zero a um máximo e depois diminui até anular-se, ou atingir um patamar inferior, para atuar novamente após pequeno intervalo de repouso (fração de segundo), procuram reproduzir as condições de campo. A amplitude e o termo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que se calculam as tensões e deformações produzidas.

O módulo de resiliência (MR) de misturas betuminosas é a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável (ε_t) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T). O módulo de resiliência é definido analiticamente pela equação 3.2.

$$MR = \left(\frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \right)_T \quad (3.2)$$

Segundo Brito (2006), o princípio do ensaio de módulo de resiliência mais utilizado no país consiste basicamente, da aplicação de uma tensão desvio pulsante – controlada por uma válvula três vias conectada a um temporizador – através de um cilindro de pressão. A carga gerada pela ação da pressão de ar comprimido liberada pela válvula três vias (solenóide) é medida pela célula de carga e então distribuída pelos frisos de carregamento ao corpo-de-prova. O deslocamento resultante é medido pelo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) preso ao corpo-de-prova por um suporte. Este deslocamento é então ampliado, por um condicionador de sinais, e armazenado em um sistema de aquisição de dados para análise.

O princípio de aplicação de carga é o mesmo do ensaio de compressão diametral, porém neste, além de o carregamento ser pulsante, ao invés de estático e monotônico, o corpo-de-prova não é levado à ruptura. O carregamento é de magnitude equivalente a um percentual da resistência à tração da mistura, usualmente ao redor de 15%. Para o cálculo do MR é então

considerada a carga à que o corpo-de-prova esta submetido por ação do carregamento cíclico e o deslocamento gerado por este carregamento.

O procedimento de ensaio para determinação do módulo de resiliência, baseado no DNER ME 133/94 segue as seguintes etapas:

- prender as alças de fixação nas faces externas do corpo-de-prova cilíndrico que se encontra apoiado horizontalmente segundo uma diretriz;
- posicionar o corpo-de-prova na base da prensa, apoiando o mesmo no friso côncavo inferior;
- assentar o pistão de carga com o friso superior em contato com o corpo-de-prova diametralmente oposto ao friso inferior;
- fixar e ajustar os medidores tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) de modo a obter registros na aquisição dos dados;
- aplicar uma carga F que produza uma tensão de tração σ_t que seja até 30% da resistência à tração determinada no ensaio de compressão diametral estático;
- a frequência de aplicação das cargas é de 1 Hz (60 ciclos por minuto) com tempo de carregamento de 0,1 segundo e 0,9 segundo de descarregamento;
- registrar os deslocamentos horizontais durante a aplicação da carga F .

Com os valores obtidos são calculados os módulos de resiliência, através da Equação 3.3.

$$MR = \frac{P}{\Delta \times h} \times (0,9976 \times \mu + 0,2692) \quad (3.3)$$

onde:

MR = Módulo de Resiliência (MPa);

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

Δ = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga (cm);

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

μ = Coeficiente de Poisson (adimensional).

Para obtenção do módulo de resiliência foram moldados e ensaiados três corpos-de-prova cilíndricos de cada mistura estudada (GE 0/10 NF, GE 0/10 Adaptada, GE 0/14 NF, GE 0/14 Adaptada) nos três tempos de estocagem (0,14 e 28 dias). O tempo de cura médio dos corpos-de-prova utilizados foi de 36 dias.

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado em duas temperaturas a 25°C e 35°C, a aplicação da carga teve frequência de 1Hz com tempo de 0,1s de carregamento e 0,9s de repouso e o valor da carga aplicada foi o correspondente a 15% da resistência à tração por compressão diametral. O coeficiente de Poisson foi fixado em 0,3 para as duas temperaturas de ensaio. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de módulo de resiliência é apresentado na Figura 3.17.



Figura 3.17 – Equipamento para o ensaio de módulo de resiliência.

3.4.4 Ensaio de fluência por compressão axial dinâmico (*creep* dinâmico)

Este ensaio tem como objetivo analisar as deformações visco-plásticas de misturas asfálticas, proporcionando uma análise comparativa em termos de resiliência mecânica à deformação permanente para diferentes misturas asfálticas.

Segundo Merighi e Suzuki (2000) existem três tendências de modelos para previsão de desempenho de misturas asfálticas quanto à formação de deformação permanente: modelos a partir de ensaios de comportamento reológico tipo *creep*; modelos desenvolvidos a partir de resultados obtidos com equipamentos simuladores de tráfego; e correlações entre o tráfego e o afundamento na trilha de roda. Prepondera a utilização dos dois primeiros, uma vez que as correlações de campo são limitadas às condições de similaridade da comparação. Quanto aos outros dois tipos, não há ainda uma tendência definida pela comunidade técnica.

Para Coelho (1996) *apud* Greco (2004), o uso do ensaio de fluência por compressão axial (*creep*) para medida das características de misturas asfálticas passou a ser largamente empregado a partir da década de 1970, ganhando força com as pesquisas realizadas no laboratório da Companhia Shell em Amsterdã, Holanda.

Segundo Motta *et al.* (1996), o ensaio de compressão axial, na versão estática ou dinâmica, está entre os mais cotados a nível internacional por sua simplicidade e representatividade. Há uma tendência mundial no sentido de se recomendar mais fortemente a realização de ensaios dinâmicos do que os estáticos na avaliação das deformações permanentes, pois seus resultados são considerados como o que melhor se comparam aos resultados de campo.

Para Greco (2004), o ensaio de compressão axial dinâmica (*creep* dinâmico) consiste na aplicação de pulsos de cargas de compressão axial ao corpo-de-prova, a uma determinada frequência, com intervalos sem carregamento entre as aplicações de carga. A deformação do corpo-de-prova é obtida em função do número de ciclos de carregamento. Assim como no ensaio de *creep* estático, não existe uma padronização para a realização do ensaio de *creep* dinâmico.

O procedimento utilizado pelo LAPAV/UFRGS segue as seguintes etapas:

- preparar os corpos-de-prova para o ensaio;

- condicionamento em estufa, na temperatura prevista para o ensaio, por um período que garanta a uniformidade da temperatura em todo o corpo-de-prova (geralmente 3 horas);
- prender as alças de suporte superior e inferior por meio de fixadores na face cilíndrica do corpo-de-prova que se encontra apoiado horizontalmente.
- posicionar o corpo-de-prova na base e assentar o pistão de carga com a placa superior em contato com o corpo-de-prova diametralmente oposto à base;
- fixar e ajustar os medidores tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) de modo a obter registros na aquisição dos dados;
- aplicar uma carga F que induza a tensão de compressão axial;
- a frequência de aplicação das cargas é de 1 Hz com tempo de carregamento de 0,1 segundo e 0,9 segundo de descarregamento. O tempo total de duração do ensaio é de uma hora (3600 ciclos de carregamento); registram-se os deslocamentos verticais durante a aplicação da carga F;
- após esse período, o corpo-de-prova é descarregado automaticamente e inicia-se o período de recuperação, com duração de 15 minutos, sendo os deslocamentos também registrados.

A deformação sofrida pelo corpo-de-prova em função do tempo possibilita o cálculo da deformação total do corpo-de-prova no final do ensaio; a deformação não recuperável ou deformação plástica, que permanece após a recuperação; a deformação recuperável ou deformação elástica, dada pela diferença entre as duas primeiras. Estes parâmetros são obtidos pelas equações (3.4) e (3.7).

$$\mathcal{E}_{esp} = \frac{\mathcal{E}_{abs}}{h_R} \quad (3.4)$$

$$\mathcal{E}_{elástica} = \mathcal{E}_{3600} - \mathcal{E}_{4500} \quad (3.5)$$

$$\mathcal{E}_{plástica} = \mathcal{E}_{4500} - \mathcal{E}_0 \quad (3.6)$$

$$\mathcal{E}_{total} = \mathcal{E}_{3600} - \mathcal{E}_0 \quad (3.7)$$

onde:

\mathcal{E}_{esp} = deformação específica, respectivamente, em qualquer instante t ; para 0, 3600 e 4500 segundos (mm/mm);

\mathcal{E}_{abs} = deformação absoluta lida diretamente pelo LVDT (mm);

h_R = altura de referência (mm);

$\mathcal{E}_{elástica}$ = deformação elástica (mm/mm);

$\mathcal{E}_{plástica}$ = deformação plástica (mm/mm);

\mathcal{E}_{total} = deformação total (mm/mm).

Para a realização do ensaio de *creep* dinâmico foram moldados e ensaiados três corpos-de-prova de cada mistura estudada (GE 0/10 NF, GE 0/10 Adaptada, GE 0/14 NF, GE 0/14 Adaptada) nos três tempos de estocagem (0,14 e 28 dias). O tempo de cura médio dos corpos-de-prova utilizados foi de 48 dias.

O ensaio de fluência por compressão axial dinâmico (*creep* dinâmico) foi realizado com cargas de 0,07 MPa. Após permanecerem em estufa a temperatura de 45°C, por um período de 3 horas, os corpos-de-prova passaram por uma fase de pré-condicionamento, na qual foram aplicados 200 ciclos de carregamento, com a mesma carga e a mesma temperatura utilizadas no ensaio, seguido de um período de descarregamento ou recuperação de 100 segundos. Imediatamente após este período de recuperação, inicia-se o ensaio, submetendo os corpos-de-prova aos parâmetros de ensaio preestabelecidos (nível de tensão e temperatura) durante 3600 segundos, enquanto as deformações foram medidas e registradas em intervalos de tempo regulares e prefixados. Após este carregamento, o corpo-de-prova foi descarregado e iniciou-se o período de recuperação, com duração de 900 segundos, sendo as deformações também registradas.

Conforme pode ser observado na Figura 3.18, a colocação dos LVDTs seguiu a técnica proposta por Vianna *et al.* (2003) onde duas alças de sustentação são introduzidas e fixadas ao

longo do corpo-de-prova e próximas às faces de contato. Os LVDTs diametralmente opostos são fixados na alça superior e regulados a tocarem na alça inferior. Os registros obtidos são provenientes dos deslocamentos entre as alças.



Figura 3.18 – Equipamento para o ensaio de *creep* dinâmico

3.4.5 Ensaio Cantabro

O ensaio Cantabro permite avaliar de maneira indireta a coesão e a resistência à desagregação das misturas asfálticas frente aos efeitos abrasivos originados pelo tráfego. Este ensaio foi desenvolvido no *Centro de Estudios de Carreteras* na Espanha, com a norma NLT 325/86, no Brasil é referenciado pela norma DNER-ES 383/99.

O procedimento para o ensaio Cantabro para determinação da perda de massa por desgaste baseado na norma DNER-ES 383/99 segue as seguintes etapas:

- pesar o corpo-de-prova do tipo Marshall e anotar seu peso;
- colocar no tambor Los Angeles o corpo-de-prova, sem carga abrasiva;
- submeter o corpo-de-prova a 300 revoluções do tambor, a uma velocidade de 30 a 33 rpm, à temperatura de 25°C;
- completada as 300 revoluções, retirar o corpo-de-prova, pesar e anotar seu peso;

- determinar o desgaste da mistura através da Equação 3.8.

$$d = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (3.8)$$

onde:

d = valor percentual do desgaste;

P₁ = peso antes do ensaio (g.);

P₂ = peso depois do ensaio (g.).

Para a realização do ensaio Cantabro foram moldados e ensaiados três corpos-de-prova de cada mistura estudada (GE 0/10 NF, GE 0/10 Adaptada, GE 0/14 NF, GE 0/14 Adaptada) nos três tempos de estocagem (0,14 e 28 dias). O tempo de cura médio dos corpos-de-prova utilizados foi de 48 dias.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Expõem-se neste capítulo, as análises e resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar o comportamento das misturas tipo *grave-émulsion*. A apresentação dos resultados será realizada de modo que permita a comparação dos diferentes tempos de estocagem de uma mesma mistura e a comparação entre as misturas de mesma classe.

Os ensaios foram realizados com três tempos de estocagem antes da compactação (0, 14 e 28 dias) para cada mistura e com diferentes tempos de cura pós-compactação, as propriedades volumétricas foram determinadas com 7 dias, os valores de módulo de resiliência e resistência à tração com 36 dias em média e os valores de estabilidade e fluência Marshall, *creep* dinâmico e Cantabro com 48 dias em média.

Para demonstrar mais claramente os resultados obtidos com as misturas tipo *grave-émulsion* os valores encontrados foram comparados com outras misturas asfálticas a frio. As misturas escolhidas foram um pré-misturado a frio denso estudado por Clerman (2004) e uma mistura reciclada a frio desenvolvida por David (2006).

4.1 Curvas Granulométricas

As curvas granulométricas de projeto utilizadas neste estudo tiveram uma boa aproximação dos valores recomendados pela norma francesa NF P 98.121, conforme pode ser observado no item 3.3.1 do Capítulo 3. Entre as curvas Adaptada e Norma Francesa de mesma classe os valores ficaram bem próximos, sendo a maior semelhança nas misturas GE 0/14, conforme pode ser observado nas Figuras 4.1 e 4.2. Estas figuras também apresentam um comparativo com outras duas misturas asfálticas a frio, um pré-misturado a frio denso faixa C DNER estudado por Clerman (2004) e uma mistura reciclada a frio (material fresado+pó) desenvolvida por David (2006). A mistura reciclada mostrou-se próxima das

misturas tipo *grave-émulsion*, tendo sua curva, na parte intermediária, uma maior quantidade de material passante nas peneiras. Em contrapartida o pré-misturado a frio denso possui em toda a sua curva valores de percentuais passantes inferiores às misturas tipo *grave-émulsion*.

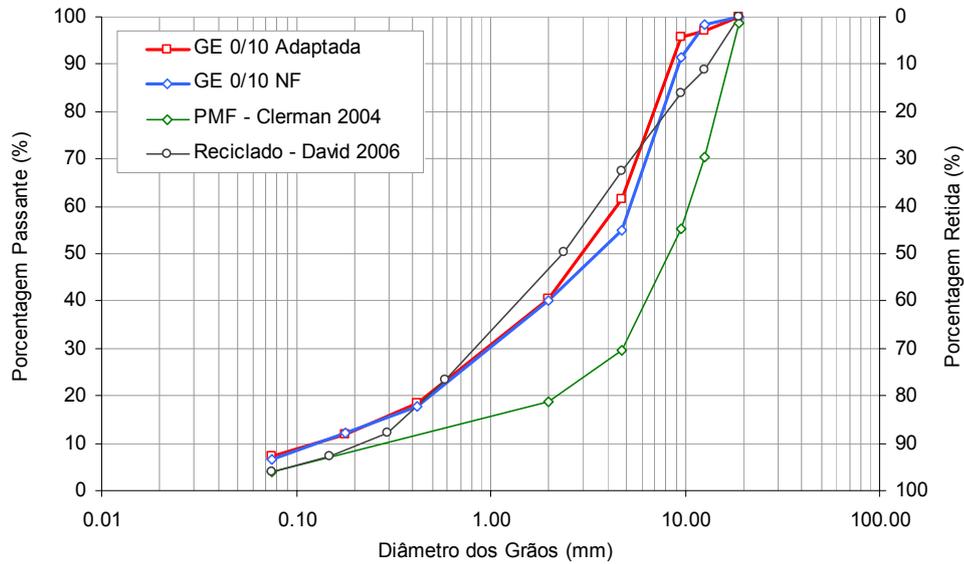


Figura 4.1– Comparação entre as curvas granulométricas deste estudo GE 0/10 e as curvas PMF – Faixa C DNER e reciclada a frio.

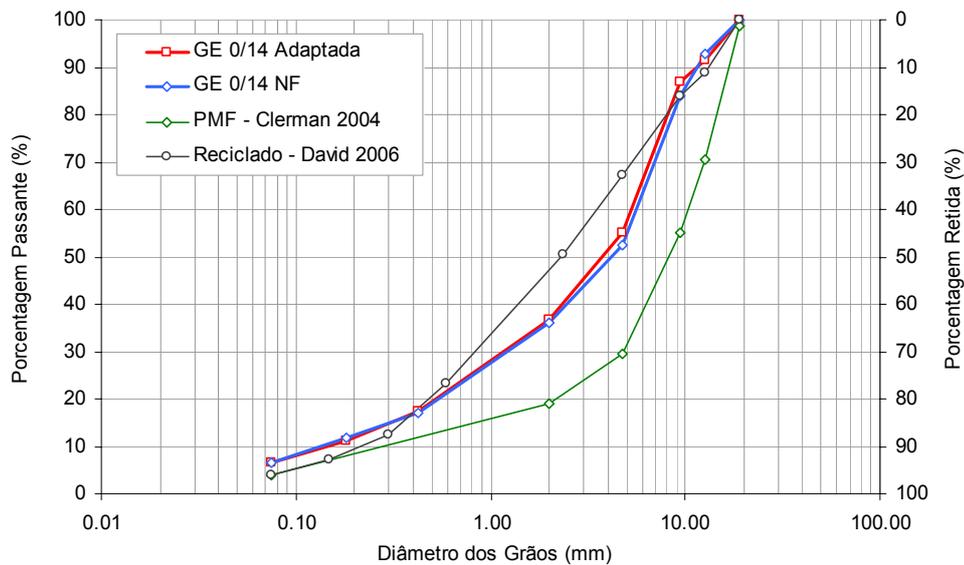


Figura 4.2– Comparação entre as curvas granulométricas deste estudo GE 0/14 e as curvas PMF – Faixa C DNER e reciclada a frio.

4.2 Emulsão asfáltica

A *grave-émulsion* é uma mistura asfáltica concebida de tal forma que os agregados graúdos sejam revestidos de forma parcial pelo ligante residual com o propósito de elevar sua coesão interna; assim o teor de ligante residual comumente utilizado é inferior aos teores das misturas asfálticas a frio tradicionais. A Figura 4.3 apresenta uma comparação entre o teor de ligante residual de algumas misturas.

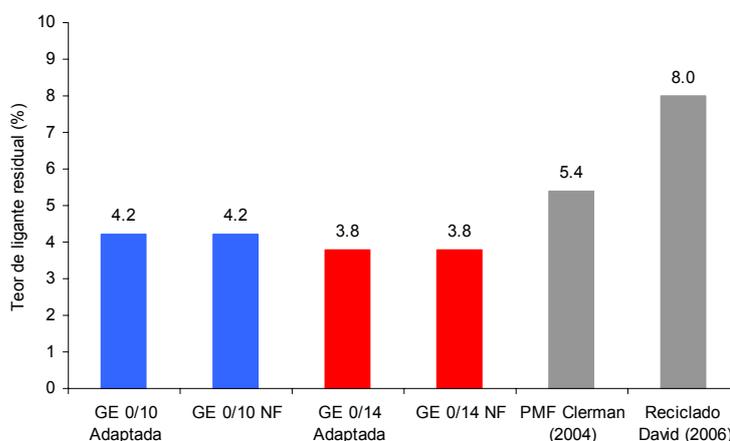


Figura 4.3– Comparação entre os teores de ligante residual deste estudo e as curvas PMF – Faixa C DNER e reciclada a frio.

4.3 Massas Específicas

As massas específicas aparente e máxima teórica, que estão apresentadas na Tabela 4.1 têm influência direta nos parâmetros volumétricos das misturas, em especial no volume de vazios. As massas específicas aparentes foram determinadas para todos os corpos-de-prova moldados; no entanto, o cálculo da média englobou somente os corpos-de-prova corretamente ensaiados. Assim o número de amostras variou de quinze a dezoito valores de massa específica aparente em cada tempo de estocagem para cada uma das misturas do tipo *grave-émulsion*.

As massas específicas máximas teóricas das quatro misturas em estudo também estão apresentadas na Tabela 4.1 e os valores correspondem à média de dois ensaios. Os resultados mostram que, tanto na GE 0/10 como na GE 0/14, as misturas Adaptadas apresentam valores mais elevados que as misturas segundo a Norma Francesa.

Tabela 4.1 – Valores das massas específicas.

Grave- émulsion	Tempo de estocagem	MEA ¹ (kN/m ³)		MEMT ² (kN/m ³)
		Média	Desv. Pad.	Média
GE 0/10 NF	0dia	20,66	0,28	24,44
	14dias	19,99	0,09	24,44
	28dias	20,10	0,12	24,44
GE 0/10 Adaptada	0dia	20,54	0,10	24,52
	14dias	20,00	0,12	24,52
	28dias	20,09	0,13	24,52
GE 0/14 NF	0dia	20,65	0,18	24,58
	14dias	20,24	0,12	24,58
	28dias	20,30	0,13	24,58
GE 0/14 Adaptada	0dia	20,65	0,09	24,65
	14dias	20,18	0,25	24,65
	28dias	20,35	0,11	24,65

Nota: ¹ massa específica aparente; ² massa específica máxima teórica.

A Figura 4.4 apresenta os valores de massa específica aparente obtidos para as quatro misturas tipo *grave-émulsion* nos três tempos de estocagem. As misturas sem tempo de estocagem apresentam valores mais elevados que as misturas com estocagem; no entanto, nas misturas com 28 dias de estocagem os valores foram um pouco superiores que os das misturas com 14 dias de estocagem. Quando se compara as quatro misturas em cada tempo de estocagem, nota-se que sem estocagem (zero dia) as misturas apresentam valores muito semelhantes, com exceção da GE 0/10 Adaptada. No entanto, com 14 e 28 dias de estocagem, as misturas GE 0/14 apresentam valores superiores que as misturas GE 0/10, tanto na situação NF como na Adaptada.

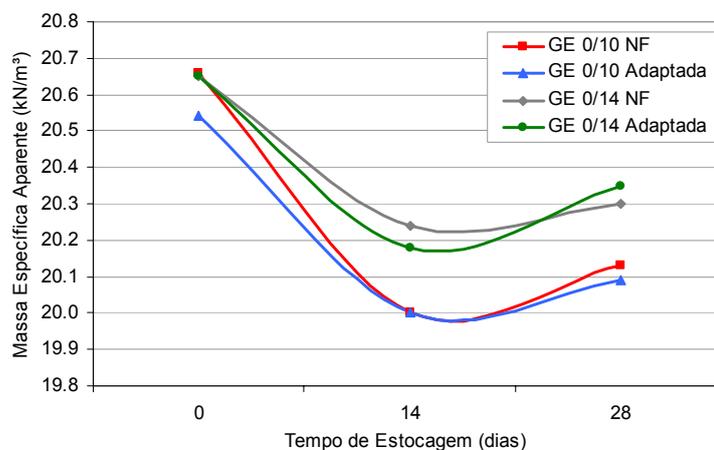


Figura 4.4 – Relação entre o tempo de estocagem das misturas e a massa específica aparente

O comportamento verificado nos valores da massa específica aparente em função do tempo de estocagem não é exclusividade deste parâmetro, como veremos a seguir, será encontrado comportamento semelhante nas propriedades volumétricas e nos ensaios mecânicos.

4.4 Propriedades Volumétricas (volume de vazios, vazios no agregado mineral e relação betume-vazios)

Na Tabela 4.2 estão apresentados os valores de volume de vazios, vazios no agregado mineral e relação betume-vazios das quatro misturas tipo *grave-émulsion* nos três tempos de estocagem. Para Specht (2004), a correta determinação das propriedades volumétricas de misturas asfálticas (volume de vazios, vazios no agregado mineral e relação betume-vazios) é de fundamental importância tanto em nível de projeto quanto em nível de controle de qualidade.

Tabela 4.2 – Valores das propriedades volumétricas.

Grave- émulsion	Tempo de estocagem	V _v ¹ (%)		VAM ² (%)		RBV ³ (%)	
		Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
GE 0/10 NF	0dia	15,48	1,13	24,11	1,02	35,88	1,97
	14dias	18,19	0,38	26,54	0,34	31,48	0,56
	28dias	17,73	0,51	26,14	0,46	32,16	0,78
GE 0/10 Adaptada	0dia	16,24	0,39	24,83	0,35	34,58	0,66
	14dias	18,44	0,50	26,80	0,45	31,20	0,71
	28dias	18,08	0,52	26,47	0,46	31,73	0,76
GE 0/14 NF	0dia	16,00	0,73	23,80	0,66	32,83	1,19
	14dias	17,66	0,49	25,31	0,45	30,25	0,71
	28dias	17,42	0,52	25,10	0,47	30,59	0,75
GE 0/14 Adaptada	0dia	16,28	0,38	24,09	0,35	32,42	0,62
	14dias	18,12	1,00	25,75	0,91	29,68	1,41
	28dias	17,49	0,45	25,19	0,41	30,56	0,66

Nota: ¹ volume de vazios; ² vazios do agregado mineral; ³ relação betume vazios.

Na Figura 4.5 estão apresentados os valores de volumes de vazios. Observa-se que as misturas com tempo de estocagem igual a zero tiveram os menores valores, conseqüentemente as misturas com 14 e 28 dias de estocagem apresentaram porcentagens de vazios superiores, sendo que para as misturas com 14 dias os valores são levemente mais elevados. Nota-se também em todas as situações que as misturas Adaptadas possuem os volumes de vazios superiores em relação às misturas Norma Francesa.

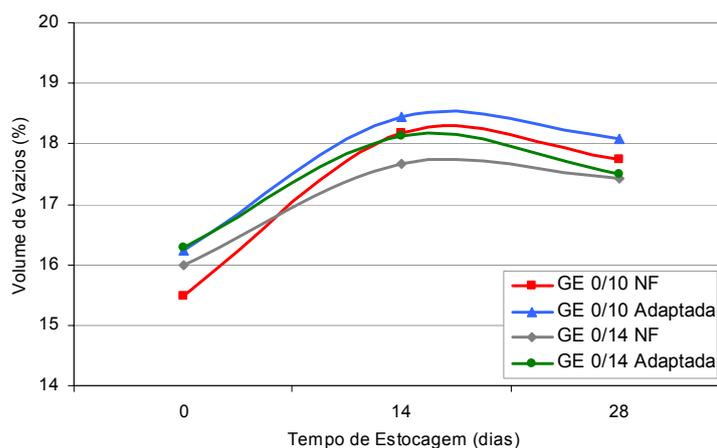


Figura 4.5 – Relação entre o tempo de estocagem das misturas e o volume de vazios.

O aumento no volume de vazios nas misturas tipo *grave-émulsion* com tempo de estocagem pode estar atrelado aos fenômenos de ruptura da emulsão asfáltica. Pois durante este processo, inúmeros vazios são preenchidos de ar e água, principalmente os vazios microscópicos, que encontram-se presos no filme do ligante ou mais precisamente na argamassa da mistura. Com o processo de estocagem estes vazios permanecem preenchidos com ar e água por um maior período e após este tempo de estocagem a compactação é incapaz de eliminar estes vazios com a mesma eficiência que ocorre nas misturas sem estocagem. A quantidade de água adicionada após o tempo de estocagem para correção da umidade de compactação, também pode influenciar para o aumento no volume de vazios.

Segundo David (2006), é pertinente considerar que, quando se emprega uma mistura com alto teor de vazios, torna-se evidente a necessidade de execução de uma camada de revestimento impermeável sobre esta, a fim de manter a sua durabilidade.

A maioria dos estudos de misturas asfálticas com emulsão não faz menção as propriedades de vazios no agregado mineral (VAM) e a relação betume-vazios (RBV). Para Santana (1993), os valores percentuais dos vazios no agregado mineral (VAM) e a relação betume-vazios (RBV) não são muito significativos nos pré-misturados a frio abertos (PMFAs) e pré-misturados a frio semi-densos (PMFsDs), justificando a sua não especificação. Entretanto, para os pré-misturados a frio densos (PMFDs), é interessante especificá-los, principalmente em obras importantes, onde se deseja um produto praticamente igual ao CBUQ usual.

A Figura 4.6 apresenta as porcentagens de vazios no agregado mineral. Verifica-se comportamento semelhante ao encontrado nas porcentagens do volume de vazios. Valores mais baixos para misturas sem estocagem (zero dia), um aumento para as misturas com 14 dias de estocagem e uma leve redução para as misturas com 28 dias de estocagem.

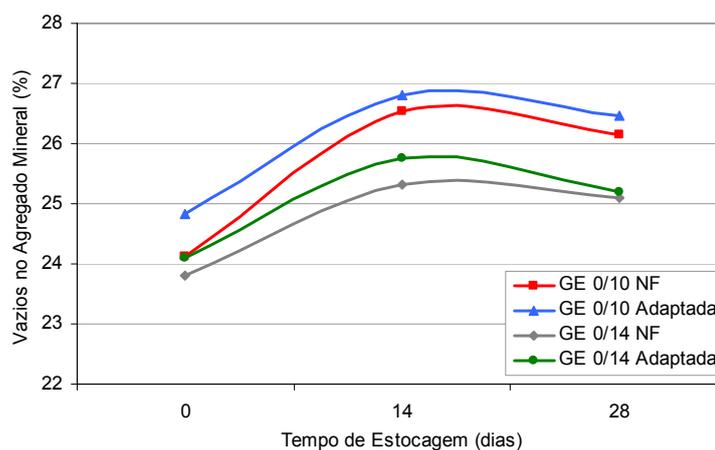


Figura 4.6 – Relação entre o tempo de estocagem das misturas e a porcentagem de vazios no agregado mineral.

A Figura 4.7 apresenta as porcentagens da relação betume-vazios. Observa-se que os menores valores são para as misturas com tempo de estocagem (14 e 28 dias) assim sendo, os maiores valores encontram-se nas misturas sem estocagem (zero dia). No entanto, as misturas com 28 dias de estocagem apresentam valores superiores quando comparadas com as misturas com 14 dias de estocagem. Os percentuais de RBV das misturas de *grave-émulsion* em qualquer tempo de estocagem apresentaram valores abaixo dos especificados por Santana (1993) para os PMFDs.

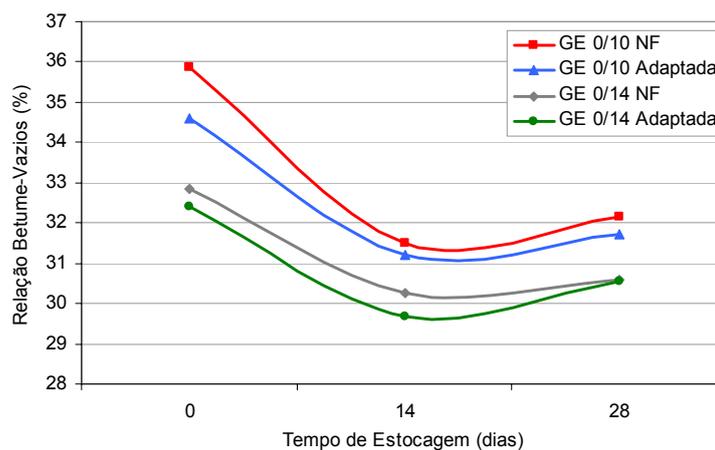


Figura 4.7 – Relação entre o tempo de estocagem das misturas e a porcentagem da relação betume-vazios.

4.5 Estabilidade e Fluência

A estabilidade representa, de maneira indireta, a resistência ao cisalhamento, intertravamento, atrito e coesão entre as partículas; já a fluência representa indiretamente, a elasticidade da mistura (Specht (2004)).

A Tabela 4.3 contém os resultados médios de estabilidade e fluência Marshall para as misturas tipo *grave-émulsion* em três tempos de estocagem. Cada valor apresentado corresponde à média de três ensaios realizados. Devido à não utilização da metodologia Marshall pelos franceses, não há uma definição dos limites destes parâmetros para as misturas de *grave-émulsion*. Assim, os resultados foram comparados com as orientações normativas dos pré-misturados a frio, sendo que todas as misturas atenderam aos valores definidos pela norma DNER ES 317/97 (estabilidade mínima de 2,50 kN para 75 golpes de compactação e fluência de 2,0 a 4,5 mm). Cabe ressaltar que, sobre os valores de fluência, apenas a mistura GE 0/14 NF com 14 dias de estocagem teve valor abaixo do limite inferior proposto pela norma.

Ogurtsova *et al.* (1999) *apud* Specht (2004) concluíram que, embora não sendo grandezas oriundas de um ensaio científico, o binômio estabilidade-fluência pode traduzir condições de desempenho para camadas betuminosas. Desta maneira, valores altos de estabilidade (acima de 5 kN), associados com valores de fluência inferiores a 5 mm, correspondem a misturas com capacidade de suportar tráfego médio, sem apresentar deformações apreciáveis.

Tabela 4.3 – Valores de estabilidade e fluência Marshall.

Grave- émulsion	Tempo de estocagem	Estabilidade (kN)		Fluência (mm)	
		Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
GE 0/10 NF	0dia	8,06	1,61	2,71	0,73
	14dias	3,97	0,42	2,23	0,41
	28dias	5,02	0,83	3,17	0,67
GE 0/10 Adaptada	0dia	6,17	0,56	2,99	0,16
	14dias	4,21	0,29	2,34	0,13
	28dias	4,91	0,17	2,30	0,26
GE 0/14 NF	0dia	6,71	0,22	2,85	0,42
	14dias	5,10	0,08	1,92	0,28
	28dias	5,37	0,42	2,13	0,11
GE 0/14 Adaptada	0dia	7,98	0,31	2,01	0,30
	14dias	3,94	0,99	2,00	0,18
	28dias	6,97	0,48	2,34	0,21

A Figura 4.8 apresenta os resultados de estabilidade para as quatro misturas estudadas nos três tempos de estocagem. Observa-se que as misturas sem estocagem (zero dia) possuem os maiores valores em relação às misturas com estocagem. No entanto, as misturas com tempo de estocagem de 28 dias apresentam valores superiores que as misturas com tempo de estocagem de 14 dias. Em uma comparação entre as misturas Adaptada e Norma Francesa com mesmo tempo de estocagem nota-se, no caso das GE 0/10, um comportamento semelhante nas misturas com 14 e 28 dias de estocagem; já no caso das GE 0/14, apresentam comportamentos similares às misturas sem estocagem e com 28 dias de estocagem.

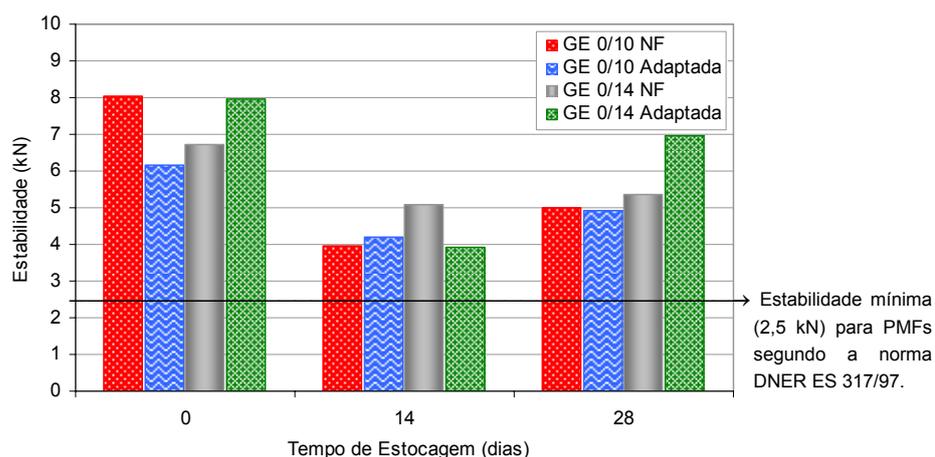


Figura 4.8 – Relação entre a estabilidade e o tempo de estocagem das misturas.

A Figura 4.9 apresenta os resultados de fluência. Observa-se que cada mistura apresenta um comportamento diferente em função do tempo de estocagem. Nas misturas Adaptada e

Norma Francesa, nota-se comportamento parecido na classe GE 0/10 sem estocagem e com 14 dias de estocagem; já na classe GE 0/14 a equivalência é entre as misturas com 14 e 28 dias de estocagem.

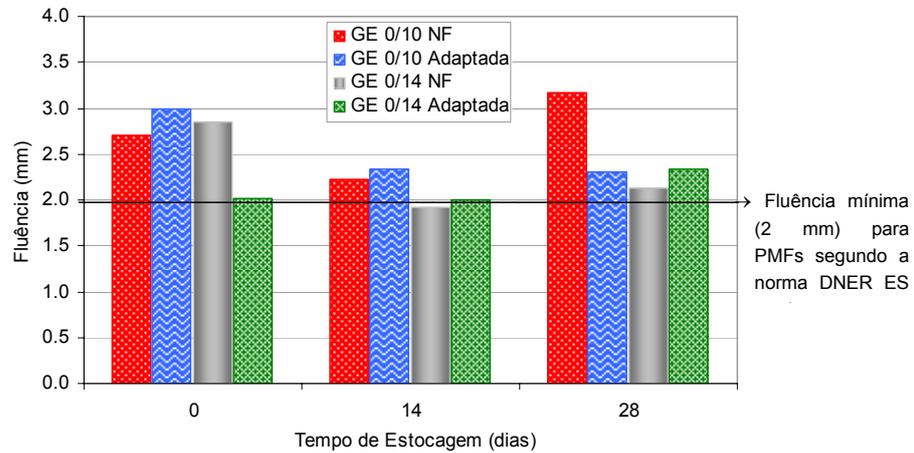


Figura 4.9 – Relação entre o tempo de estocagem das misturas e a fluência

4.6 Resistência à Tração

Os valores de resistência à tração por compressão diametral para as misturas tipo *grave-émulsion* (GE 0/10 NF, GE 0/10 Adaptada, GE 0/14 NF, GE 0/14 Adaptada), foram obtidos a partir de corpos-de-prova Marshall. O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNER-ME 138/94, nas temperaturas de 25 e 35°C. A Tabela 4.4 apresenta os resultados de resistência à tração com as respectivas médias e desvio padrão para todas as misturas em estudo.

Tabela 4.4 – Valores de resistência à tração das misturas estudadas.

Grave-émulsion	Tempo de estocagem	Resistência à Tração (MPa)					
		CP1	CP2	CP3	Média	Desv. Pad.	
GE 0/10 NF	25°C	0dia	0,35	0,36	0,32	0,34	0,02
		14dias	0,28	0,27	0,29	0,28	0,01
		28dias	0,30	0,28	0,26	0,28	0,02
	35°C	0dia	0,16	0,14	0,17	0,16	0,02
		14dias	0,13	0,16	0,15	0,15	0,02
		28dias	0,12	0,15	0,14	0,14	0,02
GE 0/10 Adaptada	25°C	0dia	0,35	0,35	0,34	0,35	0,01
		14dias	0,31	0,27	0,27	0,28	0,02
		28dias	0,29	0,28	0,30	0,29	0,01
	35°C	0dia	0,17	0,16	0,17	0,17	0,01
		14dias	0,13	0,13	0,14	0,13	0,01
		28dias	0,14	0,14	0,14	0,14	0,00
GE 0/14 NF	25°C	0dia	0,31	0,30	0,37	0,33	0,04
		14dias	0,29	0,27	0,29	0,28	0,01
		28dias	0,32	0,30	0,29	0,30	0,02
	35°C	0dia	0,15	0,16	0,14	0,15	0,01
		14dias	0,12	0,14	0,15	0,14	0,02
		28dias	0,10	0,13	0,15	0,13	0,03
GE 0/14 Adaptada	25°C	0dia	0,41	0,32	0,38	0,37	0,05
		14dias	0,31	0,29	0,28	0,29	0,02
		28dias	0,34	0,29	0,27	0,30	0,04
	35°C	0dia	0,18	0,20	0,19	0,19	0,01
		14dias	0,13	0,14	0,15	0,14	0,01
		28dias	0,14	0,16	0,17	0,16	0,02

Nas Figuras 4.10 e 4.11 são mostrados os valores de resistência à tração com diferentes temperaturas de ensaio confirmando algo já esperado: a diminuição no valor de RT com o aumento da temperatura. As misturas ensaiadas à temperatura de 35°C apresentaram uma resistência à tração inferior, de aproximadamente 50%, em relação às misturas ensaiadas com temperatura de 25°C.

Sobre o tempo de estocagem, com exceção das misturas GE 0/10 NF e GE 0/14 NF ensaiadas a temperatura de 35°C, que apresentaram um leve decréscimo na resistência à tração com o aumento do tempo de estocagem, todas as demais misturas (GE 0/10 Adaptada e GE 0/14 Adaptada em ambas as temperaturas, mais as GE 0/10 NF e GE 0/14 NF ensaiadas a 25°C) tiveram uma redução nos valores da RT entre as misturas sem estocagem (zero dia) e com 14 dias de tempo de estocagem. No entanto, entre os tempos de estocagem (14 e 28 dias), nota-se uma semelhança nos valores e em alguns casos um leve aumento da resistência à tração das misturas com 28 dias de estocagem em relação às misturas com 14 dias de estocagem.

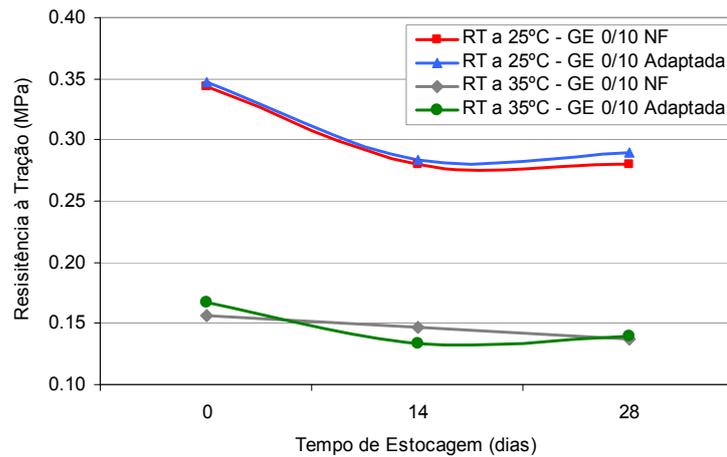


Figura 4.10 – Variação da resistência à tração das misturas GE 0/10 em função do tempo de estocagem.

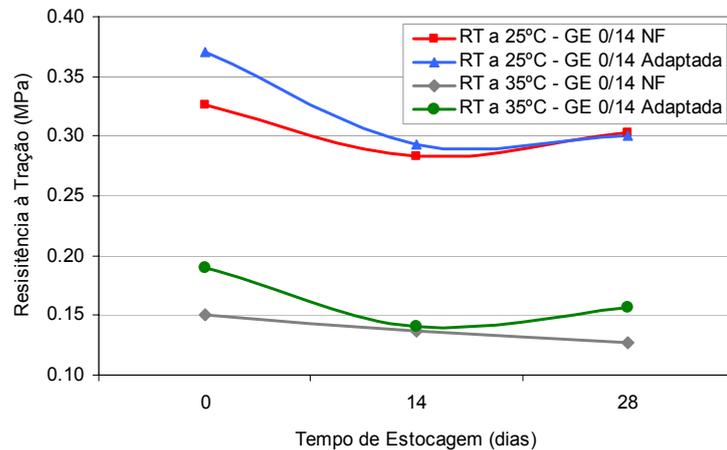


Figura 4.11 – Variação da resistência à tração das misturas GE 0/14 em função do tempo de estocagem.

A Figura 4.12 apresenta os valores de resistência à tração da mistura GE 0/10 NF com diferentes idades de cura. Esta idade de cura refere-se ao período em que os corpos de prova ficaram armazenados em local não ventilado a temperatura ambiente. Mesmo sendo os ensaios realizados com idades de cura relativamente próximas, observa-se um aumento no valor da resistência à tração com o avanço do tempo de cura, este aumento ultrapassa os 57% entre as amostras com 7 e 135 dias, em ambas as temperaturas.

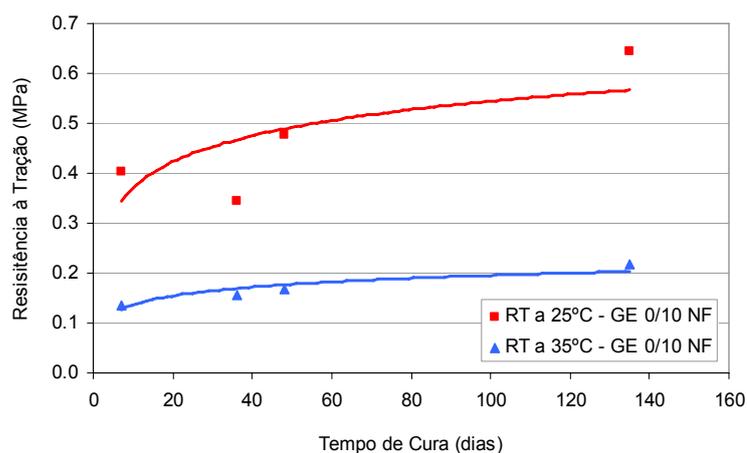


Figura 4.12 – Variação da resistência à tração da GE 0/10 NF com diferentes idades de cura.

A Figura 4.13 apresenta um comparativo entre os valores de resistência à tração das misturas tipo *grave-émulsion* com as misturas já estudadas anteriormente, todas realizadas a temperatura de 25°C. Observa-se que as misturas tipo *grave-émulsion* apresentam os menores valores nesta comparação, mas é importante ressaltar o menor tempo de cura em relação ao PMF estudado por Clerman (2004) e ao alto teor de ligante residual da mistura reciclada. Como pode ser observado na Figura 4.12, as misturas *grave-émulsion* conseguem atingir valores de resistência à tração mais elevados com um período de cura maior.

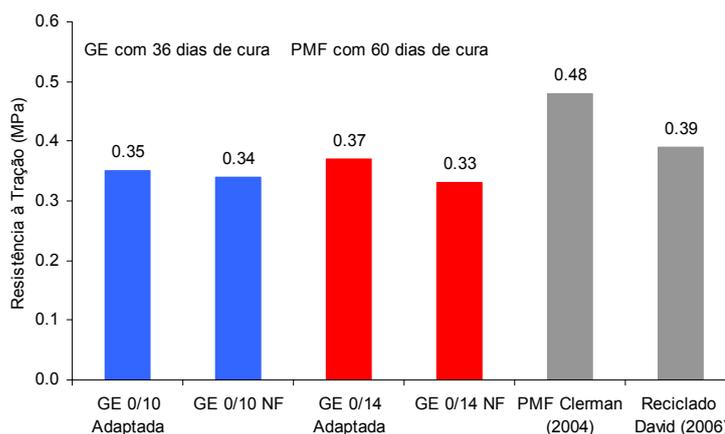


Figura 4.13 – Comparação entre os valores de resistência à tração deste estudo e as curvas PMF – Faixa C DNER e reciclada a frio.

4.7 Módulo de Resiliência

Os resultados do ensaio de módulo de resiliência das misturas de *grave-émulsion* (GE 0/10 NF, GE 0/10 Adaptada, GE 0/14 NF e GE 0/14 Adaptada) foram obtidos a partir da média de três corpos-de-prova Marshall. Os ensaios foram realizados nas temperaturas de 25°C e 35°C. A Tabela 4.5 apresenta os valores de módulo de resiliência com as respectivas médias e desvio padrão para cada grupo das misturas estudadas.

Tabela 4.5 – Valores do módulo de resiliência das misturas estudadas.

Grave-émulsion	Tempo de estocagem	Módulo de Resiliência (MPa)					
		CP1	CP2	CP3	Média	Desv. Pad.	
GE 0/10 NF	25°C	0dia	4036	4258	4625	4306	235
		14dias	2716	2872	2912	2833	104
		28dias	2591	2108	2703	2467	316
	35°C	0dia	1625	1186	1259	1357	235
		14dias	1639	1537	1500	1559	72
		28dias	1558	1774	1612	1648	112
GE 0/10 Adaptada	25°C	0dia	3218	3384	3249	3284	88
		14dias	2786	2940	2990	2905	347
		28dias	2644	2701	3431	2925	439
	35°C	0dia	2411	1719	2107	2079	347
		14dias	1324	1732	1590	1549	207
		28dias	1315	1489	1644	1483	165
GE 0/14 NF	25°C	0dia	4032	3452	4508	3997	529
		14dias	3689	3552	3645	3629	70
		28dias	2518	2914	2794	2742	203
	35°C	0dia	1691	1373	1276	1447	217
		14dias	2130	1609	1779	1839	266
		28dias	1090	1668	1412	1390	290
GE 0/14 Adaptada	25°C	0dia	5069	3556	4949	4525	841
		14dias	2894	2991	3011	2965	63
		28dias	3484	3674	2990	3383	353
	35°C	0dia	2470	2451	2510	2477	30
		14dias	1432	1499	1539	1490	54
		28dias	1676	2469	2709	2285	541

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os resultados médios do módulo de resiliência das misturas de *grave émulsion* nos três tempos de estocagem. Os ensaios de MR realizados a diferentes temperaturas (25°C e 35°C) revelam a importante influência deste parâmetro no comportamento das misturas e conseqüentemente no seu desempenho. Como já era esperado, o aumento da temperatura causa uma diminuição nos valores do módulo de resiliência. Com relação ao tempo de estocagem, as misturas apresentaram diferentes comportamentos.

O módulo de resiliência da mistura GE 0/10 Adaptada sem estocagem (zero dia) para ambas as temperaturas é maior que os valores das misturas com estocagem; no entanto

praticamente não há diferença nos valores entre as misturas com tempo de estocagem de 14 e 28 dias. As misturas GE 0/10 NF a 25°C apresenta uma considerável redução no valor do módulo de resiliência com o aumento do tempo de estocagem, em contrapartida na temperatura de 35°C ocorre um leve acréscimo nos valores do MR com o aumento do tempo de estocagem.

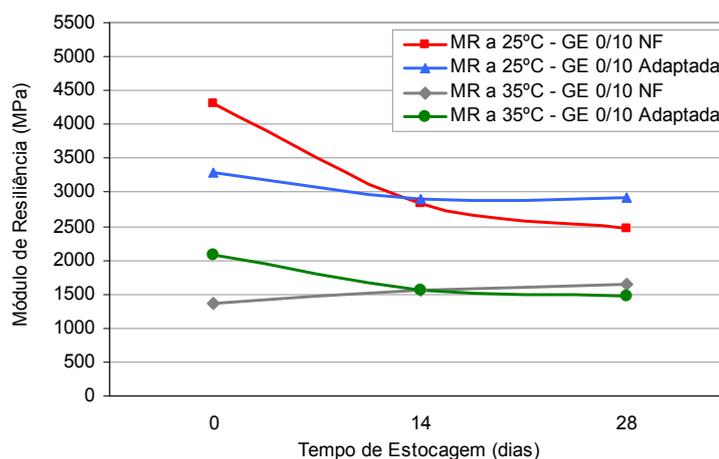


Figura 4.14 – Variação do módulo de resiliência das GE 0/10 em função do tempo de estocagem.

Nas misturas GE 0/14 Adaptada em ambas as temperaturas de ensaio, as misturas sem estocagem (zero dia) tiveram os módulos de resiliência maiores, com 14 dias de estocagem os valores diminuíram, no entanto com 28 dias houve um aumento. Nas misturas GE 0/14 NF observou-se situações diferentes para cada temperatura, a 25°C o MR diminui com o aumento do tempo de estocagem, entretanto a 35°C a mistura com 14 dias de estocagem possui um módulo de resiliência maior que a sem estocagem e com 28 dias de estocagem.

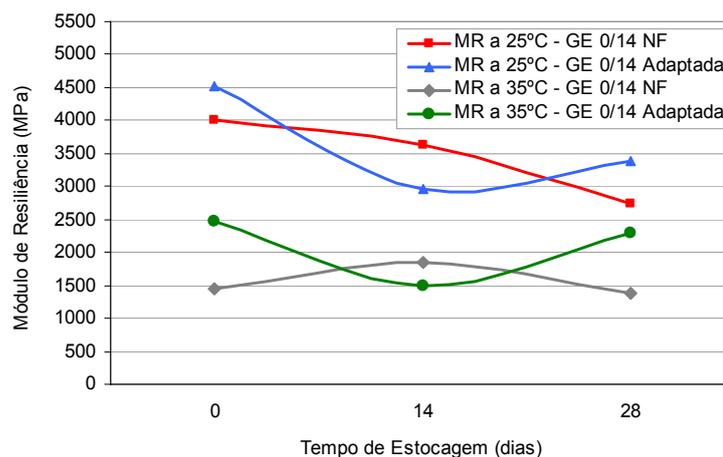


Figura 4.15 – Variação do módulo de resiliência das GE 0/14 em função do tempo de estocagem.

Na Figura 4.16 estão apresentados os valores de módulo de resiliência da mistura GE 0/10 NF com diferentes idades de cura. Mesmo sendo os ensaios realizados com idades relativamente próximas, assim como nos ensaios de resistência à tração, observa-se um aumento no valor do módulo de resiliência com o avanço do tempo de cura; este aumento ultrapassa os 45% entre as amostras com 7 e 135 dias, em ambas as temperaturas.

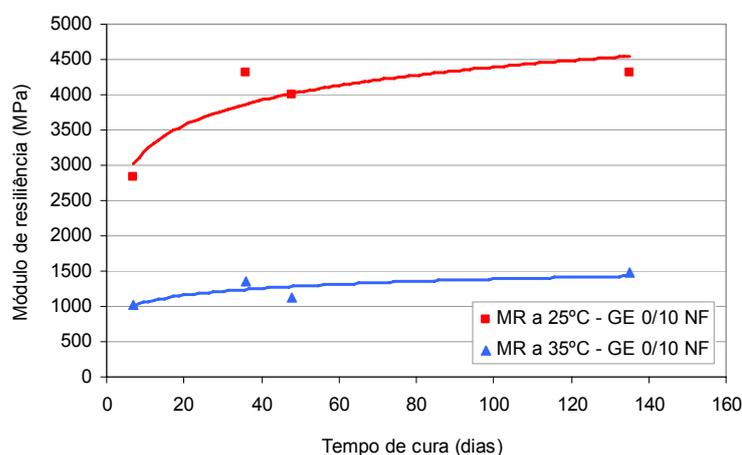


Figura 4.16 – Variação do módulo de resiliência da mistura GE 0/10 NF com diferentes idades de cura.

A Figura 4.17 apresenta um comparativo entre os valores de módulo de resiliência das misturas tipo *grave-émulsion* com as misturas já mencionadas anteriormente, todas realizadas a temperatura de 25°C. Observa-se que as misturas tipo *grave-émulsion* apresentam em todas as situações valores de módulo de resiliência superiores ao valor do pré-misturado a frio,

mesmo com um tempo de cura inferior. Em relação à mistura reciclada, os valores são inferiores.

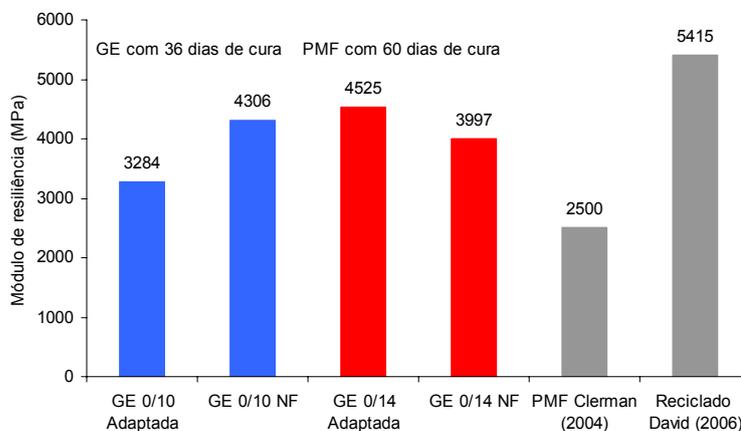


Figura 4.17 – Comparação entre os valores de módulo de resiliência deste estudo e as curvas PMF – Faixa C DNER e reciclada a frio.

4.8 Determinação da deformação permanente (*creep* dinâmico)

Os resultados do ensaio de *creep* dinâmico das misturas tipo *grave-émulsion* (GE 0/10 NF, GE 0/10 Adaptada, GE 0/14 NF e GE 0/14 Adaptada) utilizando uma tensão desvio de carregamento de 0,07 MPa foram obtidos a partir da média de três corpos-de-prova Marshall, mas devido a erros de ensaio, em alguns casos a média foi calculada com dois corpos-de-prova. A Tabela 4.6 apresenta os valores de *creep* dinâmico para cada grupo das misturas estudadas.

Tabela 4.6 – Valores do ensaio de *creep* dinâmico das misturas estudadas.

Grave-émulsion	Tempo de estocagem	Deslocamento (mm)			Deformação específica (mm/mm)		
		Elástico	Plástico	Total	Recuperável	Permanente	Total
GE 0/10 NF	0dia	0,03576	0,05056	0,08632	0,00089	0,00126	0,00216
	14dias	0,04564	0,07700	0,12264	0,00114	0,00193	0,00307
	28dias	0,03948	0,06788	0,10736	0,00099	0,00170	0,00268
GE 0/10 Adaptada	0dia	0,04616	0,04472	0,09088	0,00115	0,00112	0,00227
	14dias	0,06880	0,04896	0,11776	0,00172	0,00122	0,00294
	28dias	0,04308	0,06396	0,10700	0,00108	0,00160	0,00268
GE 0/14 NF	0dia	0,03192	0,05108	0,08300	0,00080	0,00128	0,00208
	14dias	0,03836	0,06884	0,10720	0,00096	0,00172	0,00268
	28dias	0,02024	0,06164	0,08192	0,00051	0,00154	0,00205
GE 0/14 Adaptada	0dia	0,01968	0,05352	0,07320	0,00049	0,00134	0,00183
	14dias	0,06908	0,01600	0,08508	0,00173	0,00040	0,00213
	28dias	0,03356	0,03656	0,07012	0,00084	0,00091	0,00175

A deformação permanente (deformação plástica) apresentada na Figura 4.18, mostra um comportamento semelhante entre as misturas GE 0/10 NF e GE 0/14 NF, as quais com 14 dias de estocagem possuem deformações maiores quando comparadas com as sem estocagem (zero dia) e com 28 dias de estocagem. A mistura GE 0/10 Adaptada tem sua deformação permanente aumentada com o avanço do tempo de estocagem, em contrapartida a mistura GE 0/14 Adaptada apresenta completamente diferentes em relação as demais misturas. A maior deformação permanente ocorre no tempo de estocagem zero e a menor com tempo de estocagem de 14 dias.

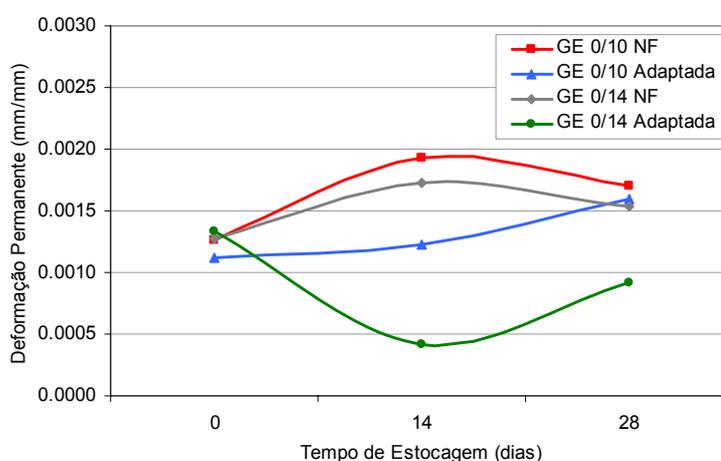


Figura 4.18 – Deformação permanente das misturas em relação ao tempo de estocagem.

A Figura 4.19 apresenta os valores de deformação específica total das misturas tipo *grave-émulsion* e de uma mistura reciclada a frio com vários teores de ligante, estudada por Silveira *et al.*(2002). Antes de realizar uma comparação é importante salientar as diferenças entre os ensaios. As misturas tipo *grave-émulsion* tiveram uma tensão de carregamento de 0,07 MPa e temperatura de 45°C e as misturas recicladas tiveram uma tensão de carregamento de 0,10 MPa e temperatura de 25°C. Mesmo com uma tensão de carregamento 30% inferior e com uma temperatura quase 2 vezes maior, as deformações das misturas tipo *grave-émulsion* apresentam-se no mínimo 2 vezes menores que as misturas recicladas, demonstrando o bom comportamento destas misturas.

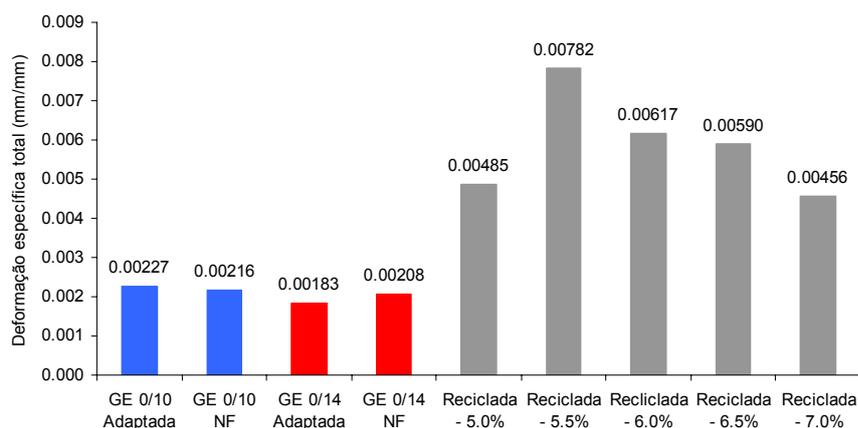


Figura 4.19 – Comparação entre creep dinâmico deste estudo e misturas recicladas a frio.

4.9 Determinação do ensaio Cantabro

Na Tabela 4.7 estão apresentados os valores do ensaio Cantabro das misturas de *grave-émulsion* nos três tempos de estocagem. Cada valor apresentado corresponde à média de três ensaios realizados. Os corpos-de-prova foram ensaiados sem nenhum tipo de condicionamento prévio.

Tabela 4.7 – Valores do ensaio Cantabro.

Grave-émulsion	Tempo de Estocagem	Perda de Massa (%)	
		Média	Desv. Pad.
GE 0/10 NF	0dia	17,98	5,55
	14dias	29,95	1,42
	28dias	49,63	7,70
GE 0/10 Adaptada	0dia	21,90	2,57
	14dias	44,74	4,25
	28dias	40,22	2,33
GE 0/14 NF	0dia	34,56	7,11
	14dias	59,49	9,23
	28dias	33,54	3,54
GE 0/14 Adaptada	0dia	34,87	7,58
	14dias	36,17	4,31
	28dias	42,61	7,40

A Figura 4.20 mostra que as misturas apresentam comportamentos diferenciados com relação ao avanço do tempo de estocagem. Nota-se, de maneira geral, que as misturas com tempo de estocagem de 14 e 28 dias apresentam uma maior perda de massa que as misturas sem estocagem (zero dia). É neste tempo de estocagem (zero dia) que as misturas Adaptadas e

Norma Francesa da mesma classe mais se aproximam e, também, há uma diferença entre as classes GE 0/10 e GE 0/14, provavelmente ocasionada pela diferença de ligante residual entre as misturas. Contudo, com exceção das misturas GE 0/10 sem estocagem (zero dia) com aproximadamente 20% de desgaste, todas as demais misturas apresentam valores de desgaste superiores a 30% os quais são considerados elevados. Nota-se neste caso que o baixo teor de ligante residual, que favorece um maior contato intergranular, prejudica o desempenho da misturas no desgaste Cantabro. A Figura 4.21 compara as misturas antes e depois da execução do ensaio.

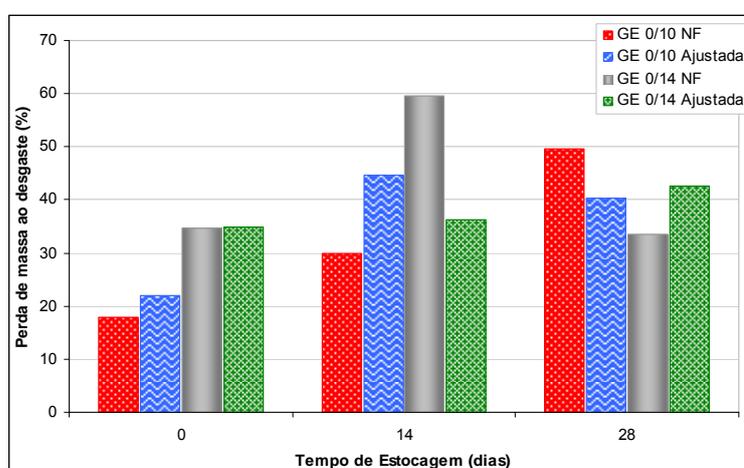


Figura 4.20 – Desgaste cantabro das misturas em relação ao tempo de estocagem.



Figura 4.21 – Comparação do desgaste de uma mistura de *grave-émulsion*: a) antes e b) depois da execução do ensaio

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Neste capítulo serão relatadas as principais conclusões obtidas a partir dos ensaios laboratoriais realizados e algumas sugestões para trabalhos futuros. Desta forma, foram estabelecidas as seguintes conclusões.

- As curvas granulométricas apresentaram uma boa aproximação em relação aos valores recomendados pela Norma Francesa. As curvas Ajustada e Norma Francesa foram análogas nas duas classes, sendo mais semelhantes na classe GE 0/14;
- A água presente nas misturas a frio é um constituinte decisivo tanto na fase de projeto como de execução, sendo muito importante a escolha de procedimentos que levem em consideração a umidade da mistura durante todas as fases da mistura;
- Os procedimentos de cura utilizados mostraram-se eficientes, num primeiro momento (antes da compactação) auxiliando na ruptura da emulsão e na determinação do teor de umidade de compactação e, num segundo momento (pós compactação), acelerando o processo de evaporação de água da mistura, sem causar danos aos corpos-de-prova;
- Na avaliação sobre o tempo de estocagem, pode-se constatar que todas as propriedades determinadas foram influenciadas pelo período de estocagem, sendo que as misturas com 14 e 28 dias de estocagem, em praticamente todas as situações, com exceção da mistura GE 0/14 NF nos ensaios de módulo de resiliência e *creep* dinâmico, apresentaram desempenhos inferiores quando comparadas com as misturas sem estocagem.

- Com o avanço do tempo de estocagem poderia esperar-se uma continuidade na redução dos desempenhos; no entanto esta hipótese não foi confirmada, pois os resultados com 14 e 28 dias de estocagem foram na maioria das situações equivalentes e em alguns casos as misturas com 28 dias apresentaram resultados superiores;
- O procedimento de estocagem adotado apresentou bons resultados, pois após o período de estocagem, apenas foi necessária uma correção de umidade para possibilitar a compactação das misturas.
- Os valores de resistência à tração das misturas foram da mesma ordem de grandeza que as demais misturas asfálticas a frio; na comparação realizada, os valores de resistência à tração das misturas tipo *grave-émulsion* são um pouco inferiores às misturas com as quais foram comparadas;
- Os valores de módulo de resiliência das misturas, quando comparados com os valores de pré-misturados a frio, demonstram-se superiores, e esta diferença é significativa;
- O ensaio de *creep* dinâmico realizado, mesmo com uma tensão de carregamento relativamente baixa, apresentou resultados satisfatórios confirmando o bom desempenho das misturas tipo *grave-émulsion*;
- O desgaste Cantabro apresentou valores de perda de massa elevados, mostrando uma fragilidade da mistura à abrasão, provavelmente devido ao baixo teor de ligante utilizado.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para continuidade deste trabalho, visando a evolução dos conhecimentos sobre o comportamento das misturas a frio tipo *grave-émulsion*, seguem algumas sugestões para estudos futuros:

- Avaliar de maneira mais abrangente a influência do tempo de cura no comportamento mecânico das misturas tipo *grave-émulsion*;

- Avaliar as misturas com um período de cura maior, para uma melhor aproximação com o desempenho que ocorre em pista;
- Realizar tempos de estocagem mais prolongados para verificar o comportamento encontrado neste estudo;
- Efetuar uma análise mecânica para verificação das tensões e deformações;
- Execução de um trecho experimental e levantamento dos principais aspectos executivos relacionados aos materiais, fabricação, armazenamento, transporte, aplicação e controle de qualidade dos materiais e da mistura asfáltica;
- Realizar ensaios triaxiais em amostras com maiores dimensões para medir o atrito da mistura, e também, testar o procedimento de ensaio realizado;
- Estudar a drenabilidade da mistura;
- Avaliação de custos das misturas tipo *grave-émulsion*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDA, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto Manual Básico de Emulsão Asfálticas: Soluções para Pavimentar sua Cidade. Brasil, 2001.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION – AFNOR. **Assises de Chaussées – Graves-émulsion. NF P 98-121** Paris, 1993.

ASPHALT INSTITUTE. **A Basic Asphalt Emulsion Manual**. USA. Manual Series N°19 (MS-19). 3° ed. 1997. 120 p.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. USA. Manual Series N° 4 (MS-4). 7° ed. 2007. 788p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados: terminologia NBR 9935**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Produtos Betuminosos semi-sólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa – classificação NBR 06296**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsão Asfáltica – Determinação do pH – classificação NBR 06299**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsão Asfáltica Catiônicas – Determinação da resistência à água (adesividade) – classificação NBR 06300**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsão Asfáltica – Determinação da carga de partícula – classificação NBR 06567**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsão Asfáltica – Determinação da sedimentação – classificação NBR 06570**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsão Asfáltica – Determinação do resíduo asfáltico por evaporação – Método expedito - classificação NBR 14376**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsão Asfáltica – Determinação da peneiração – classificação NBR 14393**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Emulsão Asfáltica Catiônica – Especificação – classificação NBR 14594**. Rio de Janeiro, 2000.

BALBO, J. T.; **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1º ed. São Paulo. Editora Oficina dos Textos, 2007. 558p.

BENSE, P.; CARBONNEAU, X.; HENRAT, J. P.; Orniérage des enrobes à l'emulsion. **Revue Générale des Routes**. nº806 p. 65-70. France, 2002.

BONVALLET, J.; BLASZCZYK, R.; Nouveaux matériels pour les nouvelles graves-émulsions. **Révue Générale des Routes**. nº768 p. 109-113. France, 1998.

BORDES, P.; VALÉRY, L.; La grave-émulsion et l'entretien localisé. **Révue Générale des Routes**. nº748 p. 29-32. France, 1997.

BOUSSAD, N.; CORNET, E.; LAFON, J. F.; LOMBARDI, B.; Experimentation de la grave-betume à froid emultech sur la RD8 à saint-gaudens. **Revue Générale des Routes et des Aerodromes**. nº757 p. 49-53. France, 1997.

BRITO, L. A. T.; **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. 2006. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre.

BROSSEAUD, Y.; **Revestimentos asfálticos franceses: panorama das técnicas, balanço de comportamento**. In: 16º Encontro de Asfalto. IBP, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

CARVALHO FILHO, C. R.; BORDES, P.; **Grave-emulsão: Técnica de mistura asfáltica a frio para manutenção e construção de vias**. 12º Reunião de Pavimentação Urbana. Aracajú, Sergipe, 2003.

CHAIGNON, F.; Colgrave, La grave emulsion de colas un atout majeur pour l'entretien. **Révue Générale des Routes**. nº673 p. 7-9. France, 1990.

CLERMAN, D. S.; **Estudo laboratorial de misturas asfálticas a frio produzidas com incorporação de borracha de pneus**. 2004. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Atlas do Transporte**. 1ª edição. Brasília, 2006.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa Rodoviária 2007: relatório gerencial**. Brasília, novembro, 2007.

COUTINHO NETO, B.; FABBRI, G. T. P.; Ensaio de fluência uniaxial estático – Avaliação do efeito devido a redução do diâmetro do prato de aplicação de carga. XVIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, v. 1, p. 127-137, 2004, Florianópolis. **Anais...** 2004.

DARTER, M. I.; WASILL, R. G.; AHLFIELD S. R.; Use of Marshall in Development of Asphalt Emulsion Mixture Design Methods and criteria. **Transportation Research Record 754**, p. 9-17. USA, 1980.

DAVID, D.; **Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado**. 2006. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre.

DENEUVILLERS, C.; POIRIER, J. E.; Enrobés à froid: caractérisation et maîtrise de la qualité de l'enrobage. **Révue Générale des Routes**. n°803 p. 77-83. France, 2002.

DENEUVILLERS, C.; Emulsions in Europe: advantages, uses and standardization. **ISSA 45th Annual Convention**. USA, 2007. Disponível em: <http://www.arra.org/datafiles/presentations/DeneuvillersEmulsionsinEuropeusesandadvantage.s.ppt>

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

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **Pavimentação: pré-misturado a frio**. DER/PR ES-P 23/05. Curitiba, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Pavimentação**: DNER, 2 ed. Rio de Janeiro, 1996, Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”**. DNER – ME 035/98. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Equivalente de areia**. DNER – ME 054/97. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. DNER – ME 081/98. Rio de Janeiro, 1998.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real**. DNER – ME 085/94. Rio de Janeiro, 1994.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente**. DNER – ME 117/94. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência.** DNER – ME 133/94. Rio de Janeiro, 1996.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cantabro.** DNER-ME 383/99. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Coleta de amostra de agregados.** DNER – PRO 120/97. Rio de Janeiro, 1997.

DIERKENS, M.; **Mesures rheologiques et modelisation de materiaux em cours de prise.** 2005. 267p. Thèse (docteur Genie Civil) L’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Lyon, France.

ECKMANN, B.; LE BEC, S.; LESUEUR, D.; BRION, Y.; **Caractérisation des enrobes à froid vis-à-vis de la mise em oeuvre et de la montéen cohésion.** *Revue Générale des Routes*. nº802 p. 51-59. France, 2002a.

GODARD, E.; **La Grava Emulsion – Un material asfáltico flexible, adaptado a las condiciones mas dificiles.** 6º Congresso Ibero-Latino americano Del Asfalto. Chile, 1991.

GRECO, J. A. S.; **Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos.** 2004. 314p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo – USP, São Carlos.

MAGALHÃES, S. T.; **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho.** 2004. 188p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro.

MAMLOUK, M. S.; WOOD L. E.; GADALLAH A. A.; **Laboratory evaluation of asphalt emulsion mixtures by use of the marshal and indirect tensile tests.** *Transportation Research Record 754*, p.17-22. USA, 1980.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G.; **Mecânica dos Pavimentos.** Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil, 2º ed. 2005.

MERIGHI, J. V.; SUZUKI, C.Y.; **O ensaio de creep dinâmico na previsão de deformação permanente de misturas asfálticas.** In: Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e controle Tecnológico, São Paulo, Brasil.

MOTTA, L. M. G.; SÁ, M. F. P.; OLIVEIRA, P. M. F.; SOUSA, A. M.; **O ensaio de creep estático e dinâmico na avaliação das misturas asfálticas.** 30ª Reunião Anual de Pavimentação - 30ª RAPv. Salvador, Bahia, 1996.

MOURÃO, F. A. L.; **Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA**. 2003. 131p. Tese (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro.

POIRIER, J. E.; CARBONNEAU, X.; HENRAT, J. P.; Les enrobés à froid: des matériaux évolutifs. **Revue Générale des Routes**. n°805 p. 49. France, 2002a.

POIRIER, J. E.; CARBONNEAU, X.; HENRAT, J. P.; Enrobés à froid: aptitude au compactage. **Revue Générale des Routes**. n°804 p. 58-66. France, 2002b.

PREGO, A. S. S.; **A memória da pavimentação no Brasil**. ABP, Associação Brasileira de Pavimentação. Rio de Janeiro, 2001.

RIBEIRO FILHO, A. A.; MACEDO, J. A. G.; SOARES, J. B.; BERNUCCI, L. L. B.; **Soluções em pré-misturados a frio (PMF) como alternativa para recapeamento em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ)**. 36ª Reunião Anual de Pavimentação-36ª RAPv. Curitiba, Paraná, 2005.

SAMANOS, J.; GUIDOUX, Y.; CORTÉ, J. F.; IRASTORZA-BARBET, D.; Méthodologie d'étude et de caractérisation des graves-émulsion structurantes: une recherche commune Direction des routes/Usirf. **Revue Générale des Routes**. n°768 p.67-69. France, 1998.

SANTANA, H.; **Manual de Pré-Misturado a frio**. IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo. Brasil, 1993.

SERFASS, J. P.; Avantages, particularités et mystères des enrobes à l'émulsion. **Revue Générale des Routes**. n°802 p. 61-69. France, 2002.

SERFASS, J. P.; Emulsion cold mixes: for a new design method. **Europeanroads review**. Special Issue, RGRA 1, p. 41-50. France, 2003.

SILVA JÚNIOR, C. A. P.; SÓRIA, M. H. A.; **Contribuição à dosagem de misturas de areia-asfalto feitas com emulsão de ruptura lenta**. 34ª Reunião Anual de Pavimentação-34ª RAPv. Campinas, São Paulo, 2003.

SILVA JÚNIOR, C. A. P.; SÓRIA, M. H. A.; **Influências da perda de umidade antes da compactação em misturas de areia-asfalto a frio feitas com emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta**. Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes 2000. In: XIV Congresso de pesquisas e ensino em transportes. p. 485-496, Gramado, Rio Grande do Sul, 2000.

SILVEIRA, M. A.; **Estudo sobre adição de polímero em areia-asfalto a frio**. 1999. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo – USP, São Carlos.

SILVEIRA, M. A.; MOREIRA, H. S.; SOARES, J. B.; **Efeito do tempo e modo de cura nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio**. 16º Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SILVEIRA, M. A.; MOREIRA, H. S.; SOARES, J. B.; **Estudo de dosagem de misturas asfálticas recicladas a frio no Ceará**. 11º Reunião de Pavimentação Urbana. Porto Alegre, Rio de Grande do Sul, 2002.

SPECHT, L. P.; **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre.

THANAYA, I. N. A.; An Alternative Design Procedure of Cold Asphalt Mixture. Disponível em: <http://www.bibcouncil.de/ISSM2002/Proceedings/paperPDF/e01.pdf> U.K.,2002a.

THANAYA, I. N. A.; Utilization of Waste Materials for Cold Asphalt Mixes. Disponível em: <http://www.bibcouncil.de/ISSM2002/Proceedings/paperPDF/e02.pdf> U.K.,2002b.

THOURET, D.; CLARAC, A.; LEMARCHAND, P.; Grave-bitume à froid: le savoir-faire colas. **Révue Générale des Routes**. nº764 p. 75-77. France,1998.

TRIQUIGNEAUX, J. P.; BROSSEAUD, Y.; Méthodologie d'étude et de caractérisation des graves-émulsion structurantes. **Revue Générale des Routes**. nº808 p. 72. France, 2002.

TUCHUMANTEL JR., O.; **Influência da umidade de compactação no PMF-Denso**. 10º Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

VIANNA, A. A. D.; MOTTA, L. M. G.; DOMINGUES, R. G.; Ensaio de compressão axial de CBUQ – Uma nova técnica de medição das deformações. XVII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, v. 1, p. 158-170, 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** 2003.

WALLER JR, H. F.; Emulsion mix design methods: An overview. **Transportation Research Record 754**, p. 1-9. USA, 1980.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)