

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE PRODUTOS  
REJUVENESCEDORES EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

**JOÃO PAULO SOUZA SILVA**

**ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.TD – 067/11**

**BRASÍLIA / DF: ABRIL/2011**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

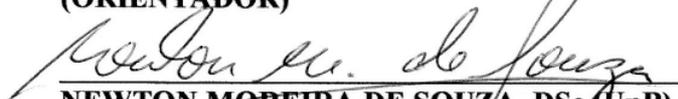
**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE PRODUTOS  
REJUVENESCEDORES EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

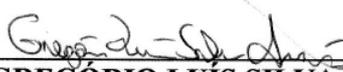
**JOÃO PAULO SOUZA SILVA, MSc**

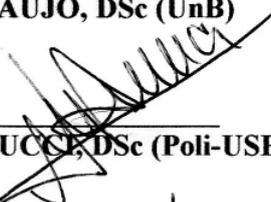
TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

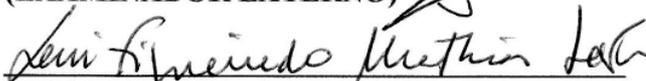
**APROVADA POR:**

  
\_\_\_\_\_  
**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

  
\_\_\_\_\_  
**NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

  
\_\_\_\_\_  
**GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, DSc (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

  
\_\_\_\_\_  
**LIÉDI LÉGI BARIANI BERNUCCÉ, DSc (Poli-USP)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

  
\_\_\_\_\_  
**LENI FIGUEIREDO MATHIAS LEITE, DSc (CENPES/PETROBRAS)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 04 de Abril de 2011.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, JOÃO PAULO SOUZA.  
Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas.[Distrito Federal] 2011  
xix, 145 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2011)  
Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Pavimentação	2. Rejuvenescimento de misturas asfálticas
3. Reciclagem	4. Avaliação mecânica de misturas recicladas
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, J.P.S. (2011). Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-067/2011, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: João Paulo Souza Silva.

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas.

GRAU / ANO: Doutor / 2011

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



João Paulo Souza Silva

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia  
Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Prédio SG-12,  
Universidade de Brasília.

CEP 70910-900 - Brasília, DF – Brasil

[jpssunb@gmail.br](mailto:jpssunb@gmail.br)

## *DEDICATÓRIA*

*À minha mãe por ser muito  
mais do que eu mereço  
pelo exemplo que é para mim.*

*Aos meus irmãos Patrícia e Robson  
por estarem sempre ao meu lado  
apoiando e vibrando comigo  
em cada conquista.*

## ***AGRADECIMENTOS***

Primeiro ao autor da minha vida Jesus Cristo, um Deus fiel que é o maior responsável por essa vitória.

Gostaria de expressar profunda gratidão à mulher mais guerreira que conheço: minha mãe, Maria de Fátima, que com amor de mãe, coração perfeito, amor infinito que jamais se acaba, sempre me deu forças para lutar nas mais difíceis batalhas, me levantou nas derrotas e vibrou com minhas vitórias.

Aos meus irmãos Patrícia e Robson, meu cunhado Elismar e minha sobrinha Millena, pelo amor, união e carinho com que sempre me incentivou durante meses de pesquisa, organização e desenvolvimento deste trabalho.

Estou especialmente grato à Universidade de Brasília, pela oportunidade que me foi concedida.

Aos amigos Andrelisa, Gregório, Janaína Tatto, Joseleide, Lorena Cristina, Luiz Gustavo e Marcelo Santana, queridos, eternos e verdadeiros.

Aos amigos Janaína Araújo e Marcus Vinícius agradeço por sempre se demonstrarem dispostos a me ajudar no transcorrer da pesquisa.

A tantos outros que colaboraram, profissional e pessoalmente através de sua compreensão e amizade para o desenvolvimento desta pesquisa.

Tenho o privilégio e o prazer de agradecer meu orientador, Professor Márcio Muniz de Farias, pelos valiosos ensinamentos, dedicação e pela presteza, que foram fundamentais para o início e término desse trabalho.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília pelo excelente curso.

Ao Laboratório de Engenharia Rodoviária do CEFTRU/UnB pela disponibilização dos equipamentos utilizados nos ensaios de laboratório.

Ao Laboratório CENPES/Petrobrás aqui representado pela tão prestativa Leni Figueiredo Mathias Leite, que gentilmente realizou os ensaios químicos desta pesquisa.

Ao apoio financeiro fomentado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

A Betunel Tecnologia em Asfaltos por ter fornecido os agentes rejuvenescedores e que gentilmente realizou os ensaios de DSR apresentados nesta pesquisa.

Foi uma excelente e gratificante experiência de vida.

## RESUMO

---

A reciclagem é um tema que vem ganhando bastante espaço em diversas áreas da engenharia. Um dos principais fatores que alavancou a preocupação com o assunto está relacionado com a disposição final dos resíduos. Quando se reaproveita um material em obras civis, indiretamente se está contribuindo para a preservação da natureza. Dentro deste contexto, a reciclagem de revestimentos asfálticos é um assunto que desperta grande interesse, mas que requer estudos mais aprofundados. Desta forma, a presente tese tem como objetivo estudar os efeitos de produtos rejuvenescedores no comportamento de misturas asfálticas utilizando material fresado de revestimento asfáltico envelhecido, visando sua aplicação em reciclagem de revestimentos de pavimentos rodoviários. Para tanto, inicialmente foram realizados diversos ensaios de laboratório no material fresado. Posteriormente foi extraído ligante residual para conhecimento de suas características físicas, químicas e reológicas, de modo a determinar o grau de deterioração em que se encontrava. Em seguida foram adicionados ao ligante residual, rejuvenescedores a base de alcatrão (RejuvaSeal) e outros a base de óleo de xisto, conhecidos comercialmente com AR-5, AR-250 e AR-500, nas taxas de 15, 20 e 25%, de modo a verificar qual teor seria apropriado para recuperar as características originais do ligante. Foram ainda confeccionadas misturas asfálticas com 100% de material fresado proveniente da Estrada Parque Indústria e Abastecimento de Brasília-DF. Utilizou-se os mesmos agentes rejuvenescedores e taxas de aplicação e em seguida as misturas asfálticas recicladas tiveram as propriedades mecânicas (módulo de resiliência, resistência à tração, estabilidade e fluência Marshall e vida de fadiga) determinadas em laboratório, de modo a verificar os benefícios que os rejuvenescedores proporcionam a esta mistura reciclada. Também foi realizado estudo do efeito selante de agente rejuvenecedor à base de alcatrão frente ao ataque químico de agentes agressores como água, gasolina e combinação destes. Outro aspecto considerado foi a avaliação do efeito do calor e do ar, utilizando a estufa RTFOT, no envelhecimento do CAP desde o início da usinagem até o início da compactação em campo, por meio do Modelo de Arrhenius. Finalmente, foram realizadas algumas simulações numéricas, com a utilização do programa KENLAYER, para se verificar o comportamento estrutural de projetos de pavimentos para diversas misturas recicladas com adição de rejuvenescedores. Entre as diversas conclusões obtidas neste trabalho tem-se que a mistura contendo 20% de AR-5 apresenta o melhor comportamento quando comparada a uma mistura nova do tipo CBUQ. As análises físicas, químicas, reológicas e mecânicas mostraram que a reciclagem de material fresado de revestimento asfáltico utilizando rejuvenecedor é uma solução tecnicamente possível e ambientalmente correta para pavimentação.

## ABSTRACT

---

Recycling is a theme that has gained a lot of space in various areas of engineering. One of the main factors that triggered the concern about the matter is related to the disposal of waste. When reuses material in civil works indirectly if it is contributing for the preservation of nature. Within this context, recycling asphalt pavement is an issue that arouses great interest, but that requires further study. Thus, this thesis study the effects of rejuvenating products in the behavior of asphalt mixtures using milled material of asphalt coating aged, for their application in recycling of coatings road pavements. To this end, many were initially performed Laboratory tests in the milled material. Was subsequently extracted asphalt residual knowledge of its physical, chemical and rheological, to determine the degree of deterioration that was. Were then added to the residual asphalt, rejuvenating the basis of tar (RejuvaSeal) and other base oil shale, known commercially with AR-5, AR-250 AR-500 and, at rates of 15, 20 and 25%, so check what content would be appropriate to recover the characteristics original asphalt. Asphalt mixtures were also made with 100% of milled material from EPIA road in Brasilia-DF. We used the same rejuvenating agents and rates application and then recycled asphalt mixtures had the mechanical properties (resilient modulus, tensile strength, Marshall Stability and creep and fatigue life) in certain laboratory to verify the benefits that rejuvenating this provides the recycled mix. Was also conducted study of the effect rejuvenator sealer tar-based front to chemical attack of aggressive agents such as water, gas and combination thereof. Another aspect considered was to evaluate the effect of heat and air, using the greenhouse RTFOT, aging of the CAP since the start of machining to the early compaction in the field, through the Arrhenius model. Finally, we performed some numerical simulations using the program KENLAYER, to verify the structural stability of projects recycled flooring for several mixtures with added rejuvenating. Among the various conclusions reached in this study is that the mixture containing 20% AR-5 has the best performance when compared to a new mixture. The physical, chemical, rheological and showed that the mechanical recycling material coating using asphalt rejuvenating solution is technically feasible and environmentally friendly paving.

# ÍNDICE

---

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - JUSTIFICATIVA .....	2
1.2 - OBJETIVO GERAL .....	3
1.3 - METODOLOGIA.....	3
1.4 - ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 - INTRODUÇÃO.....	5
2.2 - SUSTENTABILIDADE.....	5
2.3 - RECICLAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	8
2.3.1 - MÉTODOS DE RECICLAGEM.....	9
2.4 - FRESAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	13
2.5 - O MATERIAL FRESADO NO DISTRITO FEDERAL.....	14
2.6 - LIGANTES ASFÁLTICOS.....	17
2.6.1 - ESPECIFICAÇÕES DAS PROPRIEDADES DOS LIGANTES ASFÁLTICOS .....	22
2.7 - ENVELHECIMENTO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	24
2.8 - REJUVENESCIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	27
2.8.1 - AGENTES REJUVENESCEDORES A QUENTE (AR) .....	28
2.8.2 - AGENTES REJUVENESCEDORES A FRIO (ARE).....	30
2.8.3 - AGENTE REJUVENESCEDOR A BASE DE ALCATRÃO .....	31
2.9 - EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DO LIGANTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS ....	34
2.9.1 - EXTRAÇÃO POR CENTRIFUGAÇÃO .....	35
2.9.2 - RECUPERAÇÃO DE ASFALTO PELO MÉTODO ABSON .....	35
2.9.3 - RECUPERAÇÃO DE ASFALTO PELO MÉTODO ROTAVAPORADOR .....	36
2.10 - AVALIAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	37
2.11 - METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO.....	38
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
3.1 - INTRODUÇÃO .....	40
3.1.1 - MISTURA ASFÁLTICA FRESADA .....	40

3.1.2 - REJUVENESCEDORES .....	41
3.1.3 - LIGANTE ASFÁLTICO .....	42
3.1.4 - AGREGADO MINERAL.....	43
3.2 - MÉTODOS .....	44
3.2.1 - CARACTERIZAÇÃO E EXTRAÇÃO DO LIGANTE DO FRESADO.....	44
3.2.2 - CARACTERIZAÇÃO AGREGADO MINERAL .....	46
3.2.3 - CARACTERIZAÇÃO DOS REJUVENESCEDORES .....	53
3.2.4 - REJUVENESCIMENTO DO LIGANTE EXTRAÍDO DO MATERIAL FRESADO	54
3.2.5 - CARACTERIZAÇÃO DOS REJUVENESCEDORES E LIGANTES PELO MÉTODO TRADICIONAL .....	56
3.2.5.1 - ENSAIO DE PENETRAÇÃO (DNER ME 003/99) .....	56
3.2.5.2 - PONTO DE AMOLECIMENTO (DNER ME 247/94).....	57
3.2.5.3 - DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE TÉRMICA (IST).....	58
3.2.5.4 - DETERMINAÇÃO DA DUCTILIDADE (DNER ME 163/98).....	58
3.2.5.5 - PONTO DE FULGOR E COMBUSTÃO (DNER ME 148/94).....	59
3.2.5.6 - DENSIDADE DE MATERIAL BETUMINOSO (DNER ME 193/96).....	60
3.2.6 - CARACTERIZAÇÃO DOS REJUVENESCEDORES E LIGANTES PELO MÉTODO SUPERPAVE.....	61
3.2.6.1 - PERDA DE MASSA – RTFOT (ASTM D 2872/97).....	61
3.2.6.2 - VISCOSIDADE APARENTE – BROOKFIELD (ASTM 4402/95).....	63
3.2.6.3 - CISALHAMENTO DINÂMICO (DSR) .....	64
3.2.7 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS.....	65
3.2.7.1 - CROMATOGRAFIA (SARA) .....	65
3.2.7.2 - ESPECTROMETRIA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR – RNM...	66
3.2.8 - LIGANTE ENVELHECIDO ARTIFICIALMENTE EM LABORATÓRIO .....	67
3.2.8.1 - DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES E ENSAIOS.....	68
3.2.8.2 - ESCOLHA DOS VALORES LIMITES PARA AS PROPRIEDADES ANALISADAS .....	69
3.2.8.3 - DURAÇÃO DO ENVELHECIMENTO .....	70
3.2.8.4 - TEMPERATURAS DE ENSAIO .....	70
3.2.9 - MISTURAS REJUVENESCIDAS.....	70
3.2.9.1 - AVALIAÇÃO MECÂNICA .....	72

3.2.9.2 - AVALIAÇÃO AMBIENTAL .....	81
3.2.10 - EFEITO SELANTE DE AGENTE REJUVENSCEDOR .....	83
3.2.10.1 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	83
3.2.10.2 - REVESTIMENTO SUPERFICIAL .....	84
3.2.10.3 - IMERSÃO EM AGENTES AGRESSIVOS .....	85
3.2.10.4 - AVALIAÇÃO VISUAL E MECÂNICA.....	86
<b>CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>88</b>
4.1 - INTRODUÇÃO .....	88
4.2 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....	89
4.2.1 - AGREGADOS E MATERIAL FRESADO .....	89
4.2.2 - REJUVENESCEDORES .....	90
4.2.3 - CARACTERIZAÇÃO TRADICIONAL DOS LIGANTES .....	92
4.2.3.1 - ENSAIO DE PENETRAÇÃO .....	96
4.2.3.2 - PONTO DE AMOLECIMENTO.....	97
4.2.3.3 - PONTO DE FULGOR E COMBUSTÃO .....	98
4.2.3.4 - ENSAIO DE DENSIDADE.....	99
4.2.4 - CARACTERIZAÇÃO SUPERPAVE .....	100
4.2.4.1 - ENSAIO DE PERDA DE MASSA – RTFOT.....	100
4.2.4.2 - VISCOSIDADE APARENTE – BROOKFIELD.....	102
4.2.4.3 - ENSAIO DE CISLHAMENTO DINÂMICO (DSR) .....	104
4.2.5 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS.....	107
4.2.5.1 - CROMATOGRAFIA (SARA) .....	107
4.2.5.2 - ESPECTROMETRIA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR – RNM. ....	109
4.2.6 - AVALIAÇÃO AMBIENTAL .....	110
4.3 - MODELO DE ENVELHECIMENTO DO LIGANTE ASFÁLTICO .....	111
4.4 - EFEITO SELANTE DE AGENTE REJUVENSCEDOR .....	115
4.4.1 - AVALIAÇÃO VISUAL .....	116
4.4.2 - AVALIAÇÃO MECÂNICA .....	117
4.5 - REJUVENESCIMENTO DE MISTURA ASFÁLTICA ENVELHECIDA .....	119
4.5.1 - ESTABILIDADE MARSHALL E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	120
4.5.2 - MÓDULO DE RESILÊNCIA .....	124

4.5.3 - VIDA DE FADIGA .....	125
4.5.4 - ANÁLISE MECANÍSTICA .....	129
4.5.4.1 - ESTRUTURA DE PAVIMENTO E CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO .....	130
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>133</b>
5.1 - INTRODUÇÃO .....	133
5.2 - CONCLUSÕES .....	133
5.3 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	138
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>139</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2.1 – Reciclagem a quente in situ. (Modificado de Wirtgen, 2011).....	10
Figura 2.2 – Reciclagem a frio com fresagem a frio ( <i>Modificado de Lima, 2003</i> ).....	11
Figura 2.3 – Reciclagem com fresagem profunda ( <i>www.eddhickingbottom.com</i> ).....	12
Figura 2.4 - (a)Máquina fresadora (b) rolo de corte de uma fresadora (Bernucci <i>et al.</i> 2006)	13
Figura 2.5 - Curva granulométrica do material fresado (Dellabianca, 2004) .....	14
Figura 2.6 - Cálculo do volume de fresado utilizando o software <i>Inroads®</i> . .....	15
Figura 2.7 - Depósito de fresado no pátio do 2ºDR em 2010. ....	15
Figura 2.8 - (a) CBUQ construído sobre base de solo-fresado; (b) Detalhe da base solo+fresado. ....	16
Figura 2.9 - (a) Fresado usado como revestimento; (b) Detalhe do revestimento. ....	16
Figura 2.10 - Principais etapas do fracionamento do ligante asfáltico (Souza, 2010) .....	18
Figura 2.11 - Representação do modelo de micelas de Yen (Leite, 1999) .....	19
Figura 2.12 - Carregamento do tipo senoidal aplicado ao ligante asfáltico. ....	20
Figura 2.13 – Esquema de funcionamento do DSR. ....	21
Figura 2.14 - (a) Componentes elástica e viscosa do módulo complexo e (b) ligantes A e B de mesmo módulo complexo e diferentes ângulos de fase, $\delta_1$ e $\delta_2$ , respectivamente.....	22
Figura 2.15 Envelhecimento do ligante (Whiteoak, 1990 <i>apud</i> Morilha Jr., 2004).....	25
Figura 2.16. (a) Estufa RTFOT para envelhecimento em curto prazo; (b) Estufa PAV para envelhecimento em longo prazo.....	27
Figura 2.17 - (a) e (b) Mecanismos de interação rejuvenescedor-pavimento. ....	32
Figura 2.18 - Pista de aeroporto no Texas, USA, tratada com RejuvaSeal (Mah, 2006).....	33
Figura 2.19. Efeito do “RejuvaSeal” na viscosidade de um ligante (Mah, 2006).....	33
Figura 2.20 - Representação do Destilador de Abson. ....	35
Figura 2.21 - Representação do equipamento Rotavaporador .....	36
Figura 2.22 - Representação esquemática das deformações em misturas asfálticas. ....	37
Figura 3.1 - Mapa de Localização do Distrito Federal e o local de obtenção do material: (a) Estrada Parque Indústria e Abastecimento, abaixo do viaduto Ayrton Senna; (b) Processo de fresagem no local .....	41

Figura 3.2 - CAP; (a) Estado viscoelástico na temperatura ambiente; (b) Estado líquido a altas temperaturas. ....	43
Figura 3.3 - Agregado Calcário utilizado na pesquisa .....	43
Figura 3.4 - (a) Cuba do Rotarex com a mistura fresado-solvente (b) Equipamento Rotarex (c) <i>Kitasato</i> e bomba de vácuo (d) detalhe do funil de <i>Buchner</i> com filtro.....	45
Figura 3.5 - (a) Equipamento Rotavaporador (b) Balão de CO <sub>2</sub> .....	45
Figura 3.6 - Máquina <i>Los Angeles</i> ; LER-Ceftru-UnB (Araújo, 2009). ....	47
Figura 3.7 - Ensaio de densidade de agregado graúdo. ....	48
Figura 3.8 - Determinação do peso específica do pó-de-pedra: (a) seleção por peneiramento, (b) pesagem do material, (c) Frasco de <i>Chapman</i> ; (c) Frasco de <i>Chapman</i> após ensaio.....	49
Figura 3.9 – Análise granulométrica dos agregados: (a) material fresado, (b) agregado novo, (c) série de peneiras ABNT, (d) peneirador mecânico.....	50
Figura 3.10 - Adesividade do agregado graúdo: (a) antes, (b) após ensaio (Modificado de Araújo, 2009). ....	53
Figura 3.11 - (a) Agitador mecânico; (b) Hélice tipo naval.....	55
Figura 3.12 - Equipamento utilizado no ensaio de penetração: (a)Visão geral do equipamento; (b) Detalhe da penetração na amostra .....	56
Figura 3.13 - Equipamento utilizado no ensaio: (a) Aparato de ensaio; (b) Amostras em imersão; (c) Ensaio realizado. ....	57
Figura 3.14 - Amostras alongadas durante o ensaio de ductilidade.....	59
Figura 3.15 - Equipamento para determinação do ponto de fulgor: vaso aberto de Cleveland	60
Figura 3.16 - Medidas feitas para determinação da densidade de ligantes asfálticos (Souza, 2010).....	60
Figura 3.17 - (a) Preparação e (b) Pesagem da amostra; (c) Estufa RTFOT .....	62
Figura 3.18 - (a) Equipamento de viscosidade Brookfield; (b) Controlador de temperatura...	64
Figura 3.19 – Esquema do ensaio de DSR. ....	64
Figura 3.20 - Cromatografia IATROSCAN típico de um ligante asfáltico (Silva, 2005).....	65
Figura 3.21 - Obtenção das constantes do modelo de Arrhenius. ....	68
Figura 3.22 - Processo de confecção dos corpos de prova.....	71
Figura 3.23 - Esquema do ensaio de resistência à tração estática por compressão diametral (DNER-ME 138/94; Souza, 2009).....	74

Figura 3.24 - Equipamento do ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral: (a) Visão geral do equipamento; (b) Ruptura de um corpo de prova .....	75
Figura 3.25 - Equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência: (a) Visão geral; (b) Detalhe do corpo de prova e LVDTs .....	77
Figura 3.26 - Representação dos tipos de solicitações (Pinto, 1991).....	78
Figura 3.27 - Ensaio de fadiga em andamento .....	80
Figura 3.28 – Exemplo de processo de lixiviação.....	81
Figura 3.29 - Faixa Granulométrica dos corpos de prova.....	83
Figura 3.30 - Preparação dos corpos de prova: (a) Pesagem; (b) Mistura; (c) Preparo para compactação; (d) Após compactação.....	84
Figura 3.31- Corpos de prova com “RejuvaSeal”: (a) processo de revestimento; (b) Em repouso .....	84
Figura 4.1 - Curva granulométrica do material fresado antes e após extração do ligante .....	90
Figura 4.2 - Valores de Penetração antes e depois do RTFOT nos teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25% .....	96
Figura 4.3 - Ponto de Amolecimento antes e depois do RTFOT nos teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25% .....	97
Figura 4.4 - Ponto de Fulgor e Combustão para os teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25% .....	98
Figura 4.5 - Densidade das misturas nos teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25% .....	99
Figura 4.6 - Perda de Massa para os teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25% .....	100
Figura 4.7 - Penetração Retida para os teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25% .....	101
Figura 4.8 - Viscosidade para adição de 15% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT .....	102
Figura 4.9 - Viscosidade para adição de 20% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT .....	103
Figura 4.10 - Viscosidade para adição de 25% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT .....	103
Figura 4.11 – $G^*/\text{sen}\delta$ dos ligantes nos teores de adição de 15% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT.....	104
Figura 4.12 – $G^*/\text{sen}\delta$ dos ligantes nos teores de adição de 20% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT.....	104
Figura 4.13 - $G^*/\text{sen}\delta$ dos ligantes nos teores de adição de 25% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT.....	105
Figura 4.14 – Ângulo de fase para adição de 15% (a) antes do RTFOT e (b) após RTFOT. ....	106

Figura 4.15 – Ângulo de fase para adição de 20% (a) antes do RTFOT e (b) após RTFOT.	106
Figura 4.16 – Ângulo de fase para adição de 25% (a) antes do RTFOT e (b) após RTFOT.	106
Figura 4.17 - Comportamento ao longo do tempo de envelhecimento: (a) Penetração; (b) Ponto de amolecimento; (c) Viscosidade Brookfield.....	112
Figura 4.18 - Modelo de envelhecimento: (a) Penetração; (b) Ponto de amolecimento; (c) Viscosidade. ....	113
Figura 4.19 - Modelo de Envelhecimento: tempo <i>versus</i> temperatura de exposição.....	115
Figura 4.20 - Recipientes utilizados para amostras: (a) Não seladas; (b) Seladas – Alteração dos corpos de prova após imersão em gasolina: (c) Sem selagem; (d) Selados.....	116
Figura 4.21 - Planos de ruptura dos corpos de prova: (a) Com tratamento; (b) Sem tratamento .....	117
Figura 4.22 - <i>Box Plot</i> dos valores de Resistência à Tração – Corpos de prova: (a) Sem selagem; (b) Com selagem .....	117
Figura 4.23 - <i>Box Plot</i> dos valores de Módulo de Resiliência – Copos de prova: (a) Sem selagem; (b) Com selagem .....	118
Figura 4.24- (a) Estabilidade Marshall e (b) Resistência à Tração para amostras com 15% de rejuvenescedor.....	121
Figura 4.25. (a) Estabilidade Marshall e (b) Resistência à Tração para amostras com 20% de rejuvenescedor.....	121
Figura 4.26. (a) Estabilidade Marshall e (b) Resistência à Tração para amostras com 25% de rejuvenescedor.....	121
Figura 4.27 - Gráfico de área entre a resistência à tração média versus deslocamento para duas condições avaliadas: (a) Fresado Natural (CAP20), (b) Fresado+15% de RejuvaSeal. ....	122
Figura 4.28 - Gráfico de área entre a Estabilidade Marshall média versus deslocamento para duas condições avaliadas: (a) Fresado Natural (CAP20), (b) Fresado+15% de RejuvaSeal.	123
Figura 4.29 - Curvas da vida de fadiga das misturas com 15% de rejuvenescedores.....	126
Figura 4.30 – Curvas da vida de fadiga das misturas com 20% de rejuvenescedores .....	127
Figura 4.31 - Curvas da vida de fadiga das misturas com 25% de rejuvenescedores.....	127
Figura 4.32 - Perfil típico utilizado nas análises paramétricas e os parâmetros utilizados ....	130
Figura 4.33 - Esquema dos pontos de análise utilizados nas análises paramétricas .....	131

# ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 2.1- Especificações para ligantes brasileiros (Resolução ANP 19 de 11/07/2005).....	23
Tabela 2.2 - Especificação de rejuvenescedores AR (DNC) .....	29
Tabela 2.3 - Especificação dos ARE (Betunel, 2010).....	30
Tabela 2.4 - Composição do RejuvaSeal (RejuvaSeal, 2010).....	31
Tabela 3.1 - Determinação da graduação do material após análise granulométrica. ....	51
Tabela 3.2 – Ligantes produzidos a partir de misturas com rejuvenescedores .....	54
Tabela 3.3 Tabela critérios para a indicação de resultados (DNER-ME003/99) .....	56
Tabela 3.4 - Valores-limite após envelhecimento em curto prazo .....	69
Tabela 3.5. Quantidade de corpos de prova moldados.....	71
Tabela 3.6. Quantidade de corpos de prova ensaiados.....	85
Tabela 3.7 – Classificação da resistência a agentes agressores (EN 12697-43) .....	86
Tabela 4.1 - Caracterização de agregados naturais e do material fresado.....	89
Tabela 4.2 - Caracterização do rejuvenescedor à base de alcatrão .....	91
Tabela 4.3 - Caracterização dos Agentes Rejuvenescedores à base de óleo de xisto. ....	91
Tabela 4.4 - Caracterização dos Ligantes Utilizados na Pesquisa .....	93
Tabela 4.5 – Especificação técnica para o CAP 20 (DNC, 1992).....	94
Tabela 4.6 – Resultados obtidos para viscosidade Saybolt-furol.....	94
Tabela 4.7 – Resultados dos ângulos de fase obtidos para os ligantes.....	106
Tabela 4.8 – Composição química dos ligantes avaliados pelo método SARA. ....	108
Tabela 4.9 - Níveis de Significância (p%) de valores de cromatografia - método SARA.....	109
Tabela 4.10 - Níveis de Significância (p%) de valores de cromatografia - método RMN. ...	110
Tabela 4.11 - Tempos críticos verificados durante o envelhecimento .....	112
Tabela 4.12 - Constantes obtidas após ensaios .....	113
Tabela 4.13 - Classificação subjetiva da correlação dos parâmetros avaliados .....	114
Tabela 4.14 - temperatura versus tempo de exposição obtidos.....	114
Tabela 4.15 - Índices físicos para misturas avaliadas. ....	120
Tabela 4.16 - Energia desprendida durante o processo de ruptura.....	123
Tabela 4.17 - Resumo dos resultados de Estabilidade Marshall e Resistência à Tração .....	124

Tabela 4.18. Valores médios dos módulos de resiliência das misturas estudadas .....	125
Tabela 4.19 - Valores dos coeficientes $k_2$ , $n_2$ e do coeficiente de determinação $R^2$ .....	128
Tabela 4.20 - Resultados da retroanálise da vida de fadiga para o caso hipotético analisado	132

# NOMENCLATURAS E ABREVIações

---

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
<i>apud.</i>	Citado por
ASTM	American Society for Testing and Materials
AR	Aditivo asfáltico de reciclagem para misturas as quente
ARs	Agentes rejuvenescedores
ARE	Agente de reciclagem emulsionado
ARRA	The Asphalt Recycling and Reclaiming Association
BBR	Reômetro de fluência em viga
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
Ceftru	Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de prova
DER	Departamento de Estradas e Rodagem
DF	Distrito Federal
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	Dynamic Shear Rheometer
EM	Especificação de Material
EPIA	Estrada Parque Indústria e Abastecimento de Brasília
ES	Especificação de serviço
<i>et al.</i>	E outros
EUA	Estados Unidos da América
FAA	Federal Aviation Administration
Ic	Índice de Instabilidade Coloidal
IST	Índice de susceptibilidade térmica
LER	Laboratório de Engenharia Rodoviária
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
Máx.	Máximo
ME	Método de Ensaio
MG	Minas Gerais
Mín.	Mínimo
MR	Módulo de Resiliência

N	Vida de Fadiga
N.A.	Não se aplica
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
OEA	Organization of American States
ONU	Organização das Nações Unidas
PAV	Pressure Aging Vessel
PRI	Pavement Rejuvenation International
RBv	Relação betume-vazios
RejuvaSeal	Rejuvenescedor e Selador de superfície asfáltica à base de alcatrão
RMN	Ressonância magnética nuclear
RR	Emulsão asfáltica de ruptura rápida
RT	Resistência à Tração
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SARA	Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos
Sp	Spindle
SHRP	Strategic Highway Research Program
SSS	Agregado na condição Saturada Superfície Seca
Superpave	Superior Performing Asphalt Pavements
UnB	Universidade de Brasília
UTM	Universal Testing Machine
VAC	Vaso aberto de Cleveland
Vv	Volume de vazios

# SÍMBOLOS

---

A	Área de secção transversal
a	Absorção
A <sub>n</sub>	Abrasão Los Angeles
cm	Centímetro
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
cP	Centipoise
cSt	Centistoke
D	Densidade do cimento asfáltico
dmm	Décimos de milímetros
E	Módulo de Elasticidade
g	Gramas
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
Gmb	Densidade aparente
GPa	Giga Pascal
Hz	Hertz
kgf/cm <sup>2</sup>	Quilograma força por centímetro quadrado
km	Quilômetro
kN	Quilonewtons
kPa	Quilo Pascal
mℓ/min.	Mililitros por minuto
MPa	Mega Pascal
mPa.s	milipascal-segundo
N	Newton
°C	Grau Celsius
°C/min.	Grau Celsius por minuto
°R	Grau Rankine
Pa.s	Pascal-segundo
PEN	Penetração a 25°C, com 100g de carga, durante 5 segundos
rpm	Rotações por minuto
s	Segundos
T°C	Valor do ponto de amolecimento
#	Peneira
%	Porcentagem
%massa	Porcentagem em massa
φ	Ângulo de fase em misturas asfálticas
δ	Ângulo de fase em ligantes asfálticos

# CAPÍTULO 1

## *Introdução*

---

O Brasil é um país de dimensões continentais, somando mais de 194 milhões de habitantes distribuídos irregularmente sobre cerca de 8,5 milhões de km<sup>2</sup>, dotado de uma malha rodoviária pavimentada relativamente pequena em relação à malha total, por vezes em mal estado de conservação, com poucas ferrovias e uma rede fluvial de baixa utilização.

A chegada da indústria automobilística nas décadas de 50 e 60 e a política de desenvolvimento adotada estabeleceram o modal rodoviário como prioritário para o país. Sendo assim, os investimentos em infraestrutura de transportes no Brasil têm sido historicamente maiores em rodovias por possibilitarem uma maior flexibilidade no transporte de cargas e passageiros, e hoje este modal é responsável por mais de 90% do transporte de passageiros e 61% do transporte de cargas (CNT, 2009).

Atualmente no Brasil a extensão total da malha rodoviária incluindo a esfera Federal, Estadual e Municipal está em torno de 1.712.136,7 km, sendo, 212.617,4 km pavimentados e 1.499.519,3 km não pavimentados (DNIT, 2010). Os investimentos na área de transportes rodoviários de janeiro a abril de 2010 foram da ordem de 515 milhões de reais, representando 94,9% do investimento total em infraestrutura de transportes (CNT, 2010).

A deterioração verificada nos pavimentos brasileiros é em grande parte causada pelo excesso de carga por eixo dos veículos transportadores e pela falta de manutenção das rodovias, aliada às intempéries. Estes mecanismos causam rompimento da camada de revestimento provocando assim grande desconforto e prejuízo ao usuário.

Segundo o levantamento realizado pela Confederação Nacional dos Transportes (CNT) em 2009, dos 89.552 km de malha rodoviária analisados no país, 43,4% (38.870 km) apresentam

condição de superfície de rolamento, predominantemente, perfeita. Por sua vez, 33,1 % dos pavimentos apresentam sinais de desgaste e 23,5 % predominam os defeitos tais como, trinca em malha e/ou remendos (17,8%), afundamentos, ondulações e buracos (4,6%) e pavimento totalmente destruído correspondendo a 1,1%.

## 1.1 - JUSTIFICATIVA

O meio técnico rodoviário tem se esforçado para buscar novas tecnologias e desenvolver soluções mais econômicas de restauração dos pavimentos, muitos já bastante deteriorados. Entre as novas metodologias estudadas, destaca-se a reciclagem dos revestimentos asfálticos, que além de apresentar rapidez executiva e custos competitivos, preza pelo aspecto ambiental (Dellabianca, 2004).

Segundo Bonfim & Domingues (1995), a reciclagem de misturas asfálticas vem sendo executada no Brasil desde meados da década de 1980, principalmente após a introdução de máquinas fresadoras no país. Este tipo de reciclagem reaproveita o material da capa asfáltica fresado, posteriormente utilizado com revestimento ou *binder* a partir da incorporação de agentes rejuvenescedores que recuperam as características do ligante original envelhecido.

O envelhecimento do ligante em misturas asfálticas ocorre devido ao efeito da temperatura, do ar, da luz solar, da chuva e do tempo, que resulta em um aumento da consistência do asfalto e em maior rigidez da camada betuminosa. Este “endurecimento” do ligante asfáltico, combinado com a ação do tráfego, acarreta o aparecimento de fissuras e degradação acelerada no pavimento (Silva, 2005).

Essas misturas asfálticas envelhecidas, entretanto, podem ser recuperadas por meio da incorporação de aditivos químicos, chamados agentes rejuvenescedores, que têm como finalidade repor os compostos aromáticos e resinas para que as propriedades originais do ligante sejam restabelecidas.

O interesse em estudar este tema partiu da necessidade de testar produtos internacionais e nacionais para recuperação dos materiais comumente aplicados no Distrito Federal, em suas condições climáticas.

Diante deste fato e devido à escassez de pesquisas nacionais referentes ao assunto, este trabalho foi idealizado e desenvolvido na tentativa de se obter o domínio das condições e taxas de aplicação de agentes rejuvenescedores em materiais fresados, além de em materiais envelhecidos *in situ*. Assim, potencializa-se a reciclagem de toneladas de materiais de revestimentos asfálticos deteriorados, que podem ser empregados na pavimentação de dezenas de quilômetros em estradas vicinais e nas cidades-satélites do Distrito Federal.

## **1.2 - OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste trabalho é investigar os mecanismos de envelhecimento do ligante asfáltico usado em misturas densas no Distrito Federal e verificar a eficiência e eficácia de produtos ditos rejuvenescedores nas propriedades químicas, físicas e reológicas do ligante residual presente em materiais fresados de revestimentos asfálticos deteriorados, bem como nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas a partir destes materiais.

## **1.3 - METODOLOGIA**

A proposta inicial deste trabalho é investigar os mecanismos de envelhecimento de ligantes asfálticos puros utilizados em pavimentação. Em seguida, realiza-se um trabalho aprofundado sobre os efeitos de rejuvenescedores em misturas asfálticas, utilizando produtos rejuvenescedores disponíveis nos mercados nacional e internacional. A partir disso, pretende-se investigar a eficácia (como fazer) e eficiência (nível de sucesso) da utilização destes produtos para a recuperação de pistas degradadas pela ação do tráfego e das intempéries, bem como para a reciclagem de revestimentos asfálticos fresados de pistas deterioradas.

Foi também investigado o efeito destes produtos nas propriedades mecânicas de misturas às quais forem adicionados. Além disso, será verificado o efeito selante contra ataques de água e óleos combustíveis e como estes agentes agressivos afetam as propriedades da mistura asfáltica.

## **1.4 - ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho encontra-se estruturado em capítulos conforme descrito a seguir:

### *Capítulo 1 - Introdução*

Este capítulo apresenta um breve histórico do tema e os objetivos para desenvolvimento do trabalho.

### *Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica*

Neste capítulo são apresentados os aspectos teóricos relacionados com a reciclagem de pavimentos, propiciando ao leitor familiarizar-se com o tema, bem como introduzindo os conceitos básicos para a compreensão do trabalho. Também foram abordados os ensaios necessários para a caracterização de todos os materiais envolvidos e os principais ensaios de caracterização mecânica das misturas recicladas e rejuvenescidas.

### *Capítulo 3 – Materiais e Métodos*

Este capítulo refere-se aos conceitos e critérios utilizados no planejamento e execução dos ensaios de laboratório, especificam-se os materiais (ligante, agregado e agentes rejuvenescedores) e os aparelhos utilizados, fazendo-se referências às normas regulamentadoras dos mesmos. Os ensaios são ilustrados com fotografias, e têm seus funcionamentos descritos.

### *Capítulo 5 - Apresentação e Análise de resultados*

Aqui são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas campanhas laboratoriais. Esses resultados são analisados e comparados com parâmetros estabelecidos em normas e trabalhos técnicos.

### *Capítulo 6 - Conclusões*

Refere-se às conclusões obtidas a partir dos dados referentes aos ensaios de laboratório além de sugestões para pesquisas futuras.

# CAPÍTULO 2

## *Revisão Bibliográfica*

---

### **2.1 - INTRODUÇÃO**

Neste capítulo são apresentados tópicos relacionados com a reciclagem de pavimentos, de modo a possibilitar uma melhor compreensão do que é esta técnica, quais as metodologias comumente utilizadas para execução. Abordaram-se também os ensaios necessários para a caracterização química, física, reológica e mecânica dos materiais e misturas recicladas.

### **2.2 - SUSTENTABILIDADE**

Até o fim da década de 60 os países considerados desenvolvidos eram aqueles que possuíam maior renda per capita. Neste contexto, os termos desenvolvimento e crescimento eram usados com o mesmo significado, porém as mudanças de pensamento verificadas após esta década levaram à necessidade de melhor definir estes termos.

Crescimento econômico hoje é entendido como o crescimento contínuo do produto nacional em termos globais ao longo do tempo, enquanto desenvolvimento econômico representa não apenas o crescimento da produção nacional, mas também, a forma como está distribuída social e setorialmente. O desenvolvimento econômico então é complementado por indicadores que expressam a qualidade de vida dos indivíduos, não sendo incorporadas nestes indicadores as dimensões ecológicas e culturais.

Na década de 1970 começaram a surgir críticas sobre os efeitos prejudiciais ao meio ambiente decorrentes da atividade industrial e do crescimento econômico. Nesta década surgiram reflexões sobre a questão ambiental. Em 1972 foi publicado pelo clube de Roma um informe denominado “limites do crescimento” com o objetivo de alertar a humanidade para a

necessidade de maior prudência nos seus estilos de desenvolvimento. Neste informe foi destacado que, se as taxas de crescimento demográfico e econômico continuassem no mesmo ritmo, ocorreria escassez e esgotamento dos recursos naturais não renováveis entre os quais se encontra o petróleo (Bayardino, 2004).

Na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente, que reuniu 113 países e foi realizada na cidade de Estocolmo em junho de 1972, quase todas as nações industrializadas promulgaram legislações e regulamentos ambientais. Além disso, criaram organismos ou ministérios encarregados do meio ambiente para enfrentar de maneira eficaz a degradação da natureza.

Em 1987, o relatório “Nosso Futuro Comum” da Comissão Brundtland propôs a integração dos conceitos meio ambiente e desenvolvimento com o intuito de alcançar o desenvolvimento sustentável o qual foi definido como: aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades.

Em 1992 realizou-se no Rio de Janeiro a Conferência da ONU sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, com a participação de 170 países tendo como objetivos:

- Recomendar medidas a serem tomadas, nacional e internacionalmente, referentes à proteção ambiental através de uma política de desenvolvimento sustentado;
- Promover o aperfeiçoamento da legislação ambiental internacional;
- Examinar estratégias de promoção do desenvolvimento sustentável e da eliminação da pobreza nos países em desenvolvimento, entre outros.

Na Conferência, reconheceu-se a insustentabilidade do modelo de desenvolvimento então vigente. O desenvolvimento sustentável foi então visto como o novo modelo a ser buscado. Nessa conferência foi definido um plano de ação para o meio ambiente e o desenvolvimento no século XXI denominado Agenda 21.

Em 1997 realizou-se em Kyoto, a 3ª Conferência das Partes para a Convenção das Mudanças Climáticas. As 38 nações industrializadas concordaram em reduzir suas emissões de gases estufa a níveis abaixo dos níveis verificados em 1990 até 2012.

Atualmente os recursos naturais e minerais do planeta estão sendo explorados a uma velocidade muito maior do que aquela em que são repostos. Essa percepção levou a uma crescente valorização da importância de se assegurar que a contribuição dos recursos naturais para o processo de desenvolvimento seja sustentável ao longo do tempo (OEA 2010).

A fim de minimizar este problema a sociedade precisa educar suas ações, estabelecer limites de consumo, o que não envolve apenas os consumidores, mas também as empresas que devem desenvolver produtos ecologicamente corretos, com materiais e processos que não agridam o meio ambiente. Esse fato terá influência direta na economia de algumas empresas, que poderão ter seus lucros reduzidos em nome da conservação ambiental (Guaintolini 2010).

O desenvolvimento sustentável não deve ser apenas econômico; é necessário planejar ações e programas (governamentais ou não) que levem em conta a sustentabilidade econômica, ambiental e social. No caminho para a sustentabilidade, é importante observar e mudar atitudes em relação a alguns aspectos como, por exemplo, usar conscientemente os recursos naturais do planeta, melhorar a distribuição de renda, oferecer mais empregos e diminuir as diferenças sociais, promover uma melhor distribuição e crescimento ordenado da população das cidades (Guaintolini, 2010).

Essa abordagem deve ser complementada por medidas que utilizem as oportunidades que a urbanização oferece para criar cidades sustentáveis. Uma cidade a caminho da sustentabilidade melhora a saúde pública e o bem-estar, reduz seus impactos ambientais negativos, recicla de forma cada vez mais intensa seus materiais e usa a energia com uma eficiência cada vez maior (OEA, 2010).

Uma pesquisa feita por especialistas das universidades americanas de Yale e Columbia publicada no Fórum Econômico Mundial de Davos em 2010 na Suíça classifica 163 países em dez categorias ambientais tais como: qualidade do ar, gestão de água, biodiversidade, pesca e agricultura, assim como o combate à mudança climática. O Brasil aparece na 62ª posição entre os países com melhor gestão no controle da poluição ambiental e nos recursos naturais, ficando atrás dos Estados Unidos. Esta lista é encabeçada pela Islândia, seguida da Suíça e da Costa Rica (Agência EFE, 2010).

### 2.3 - RECICLAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

O termo reciclagem se destacou no final dos anos 80 quando foi constatado que as fontes de petróleo e de outras matérias-primas não renováveis estavam se esgotando rapidamente, e começava a existir a preocupação ambiental com a disposição final dos resíduos.

Hendriks *et al.* (2007) definem reciclagem como sendo o reaproveitamento de materiais beneficiados como matéria-prima para um novo produto. Muitos materiais podem ser reciclados e os exemplos mais comuns são o papel, o vidro, o metal e o plástico. As maiores vantagens da reciclagem são a minimização da utilização de fontes naturais, muitas vezes não renováveis, como por exemplo os ligantes asfálticos betuminosos que são oriundos da extração mineral do petróleo.

Segundo Roberts *et al.* (1996), o início da aplicação das técnicas de reciclagem de pavimentos asfálticos ocorreu por volta de 1915, entretanto a utilização do cimento asfáltico de petróleo (CAP) neste tipo de obra é anterior aos anos 30, período em que surgiram as primeiras máquinas fresadoras nos Estados Unidos.

A reciclagem de revestimentos asfálticos é um processo pelo qual uma mistura asfáltica existente, geralmente em condição deteriorada, é fresada e misturada a novos agregados e a um novo ligante asfáltico, possibilitando seu reaproveitamento na construção de uma nova camada, incorporando ou não novos materiais que permitem a obtenção de um pavimento com características mecânicas e funcionais semelhantes e até superiores ao pavimento antigo.

Existem casos em que o material fresado é utilizado como agregado, com adição apenas de ligante novo. Segundo Bonfim (2001), alguns autores classificam o reaproveitamento deste material como reutilização, quando este é aplicado para exercer função diferente da inicial. Quanto se trata de uma obra rodoviária de pavimentação, somente é considerado reciclagem quando há regeneração, ou rejuvenescimento, dos materiais asfálticos, com aplicação do material para exercer a mesma função inicial (Vasconcelos & Soares, 2004).

Uma das principais vantagens da utilização de materiais fresados na pavimentação asfáltica está no fato de que a maioria dos materiais já se encontram no local, dispensando o transporte e a exploração de jazidas para empréstimo de novos materiais. Segundo o antigo

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, hoje DNIT (DNER, 1998-b), o principal que a reciclagem pode oferecer é a conservação de agregados, de ligantes e de energia, preservando o meio ambiente e mantendo as condições de geometria da via (Lima, 2003).

De acordo com Castro (2003), a rodovia Anhanguera no trecho entre São Paulo e Campinas foi a primeira rodovia a ser reciclada no Brasil em 1986, sendo que em 1960 a prefeitura municipal do Rio de Janeiro já havia utilizado técnicas de reciclagem de revestimento betuminoso, onde o mesmo era removido por meio de marteleto e transportado para a usina para ser misturado novamente. Este processo de reciclagem teve vida útil até meados de 2014.

Peterson *et al.* (1994) estimavam que nos anos 90 cerca de 27 milhões de toneladas de ligante asfáltico e aproximadamente meio bilhão de toneladas de agregados foram consumidos a cada ano na construção e manutenção de rodovias nos Estados Unidos. Quando reutilizado, parte desse material certamente não seria disposto em locais inadequados, como aterros sanitários ou em vias rurais, evitando assim impactos ambientais negativos ao meio ambiente.

Lima (2003) comenta que a economia de energia, a manutenção do perfil geométrico existente e a correção de defeitos superficiais no revestimento são algumas das inúmeras vantagens do uso da reciclagem de pavimentos em relação às tradicionais técnicas construtivas de pavimentos, permitindo também a diminuição do tempo necessário para execução de obras de restauração de vias, bastante conveniente principalmente quando se trata de intervenções em vias urbanas.

### **2.3.1 - MÉTODOS DE RECICLAGEM**

Ao longo dos anos, desde seu surgimento, a reciclagem de pavimentos tem se mostrado uma boa alternativa de restauração das condições de trafegabilidade de vias em níveis satisfatórios, tanto do ponto de vista técnico quanto financeiro.

O Manual de Reabilitação de Pavimentos do DNIT (DNER, 1998), traz informações sobre as diversas alternativas de reciclagem, que dependem de diversos fatores, entre os quais podem ser citados os seguintes:

- ✓ Observação dos defeitos do pavimento;

- ✓ Determinação das prováveis causas dos defeitos, baseado em estudos de laboratório e de campo;
- ✓ Informações do projeto e histórico das intervenções de conservação;
- ✓ Custos;
- ✓ Histórico do desempenho do pavimento;
- ✓ Restrições quanto à geometria da rodovia (horizontal e vertical);
- ✓ Fatores ambientais;
- ✓ Tráfego.

Baseado neste mesmo manual, Castro (2003) classifica de diversas formas os principais tipos de reciclagem utilizados na recuperação de rodovias em função do tipo de pavimento, da profundidade de corte, do uso da mistura, do tipo de técnica de fresagem e do local de processamento. A seguir apresentam-se as principais categorias de diferentes métodos de reciclagem, definida pela associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (*The Asphalt Recycling and Reclaiming Association – ARRA*).

➤ **Reciclagem à Quente (*Hot recycling*)** – processo em que parte ou todo o revestimento asfáltico é removido e reduzido a dimensões apropriadas para depois ser misturado a quente no próprio local ou em usina estacionária. O processo pode incluir a adição de novos agregados, cimento asfáltico e agente rejuvenescedor, conforme mostra a Figura 2.1.

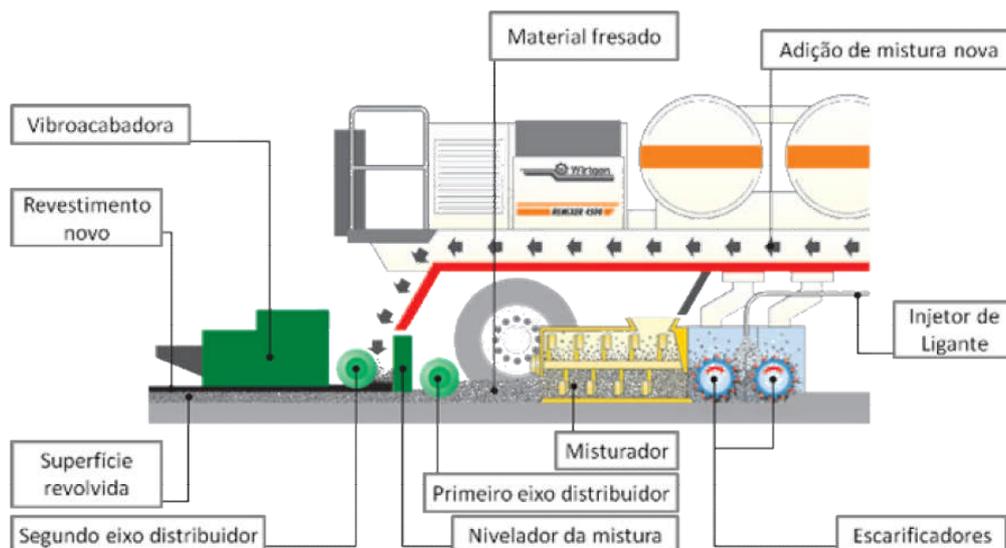


Figura 2.1 – Reciclagem a quente in situ. (Modificado de Wirtgen, 2011)

O produto final deve atender às especificações de misturas asfálticas a quente destinadas às camadas de base, de ligação ou de rolamento. Este tipo de reciclagem pode ser dividida em duas categorias:

✓ **Reciclagem à Quente em Usina estacionária** – processo pelo qual parte ou toda a estrutura do revestimento é removida e reduzida, geralmente mediante fresagem a frio, e posteriormente transportada para ser misturada e recuperada em usina de asfalto. Segundo Ramos *et al.* (1996), quando a reciclagem é feita em usina gravimétrica a porcentagem de fresado utilizado é de até 50% da composição da massa a ser reciclada. Esta proporção pode ser aumentada em até 80% caso se use um tambor secador;

✓ **Reciclagem à Quente "in situ"** - A reciclagem a quente no local é um processo onde se remove uma espessura de 2,5 a 5 centímetros do pavimento por meio fresagem. Neste processo, o pavimento é reduzido a dimensões apropriadas e depois é misturado a quente no próprio local. Esta técnica é indicada apenas para correção de defeitos superficiais como: desagregação, trincas, perda de atrito, exsudação, corrugação superficial, trilha de roda e oxidação excessiva;

➤ **Reciclagem à Frio (Cold planning)** – Para reciclagem a frio deve ser usada emulsão asfáltica, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos (Figura 2.2). O composto final deve ser empregado como camada de binder. Segundo Rogge & Hicks (1993) os pavimentos mais adequados para se usar reciclagem a frio são os pavimentos trincados, com recapeamentos sucessivos, com problemas de drenagem entre as camadas originais e de reforço, com desagregação do revestimento, quando o volume médio diário de veículos seja inferior a 5000 e quando o agregado na região é escasso.

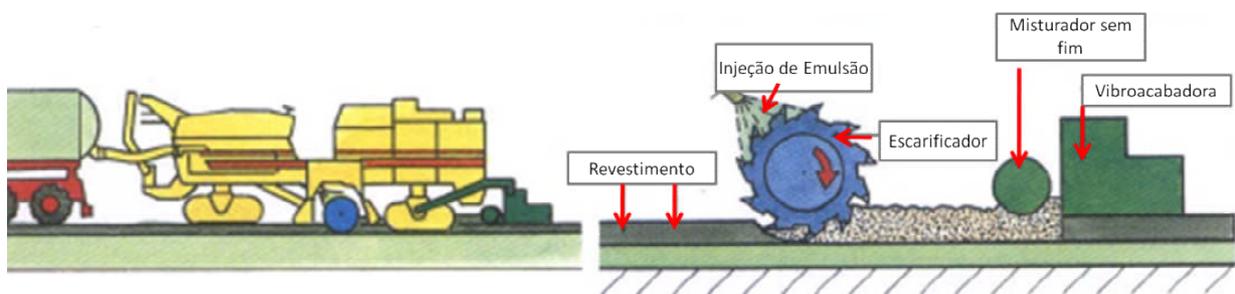


Figura 2.2 – Reciclagem a frio com fresagem a frio (Modificado de Lima, 2003).

De maneira semelhante à reciclagem a quente, a reciclagem a frio pode ser dividida em duas categorias:

✓ **Reciclagem a Frio em Usina** – o revestimento é fresado e transportados para uma unidade móvel de mistura a frio localizado nas proximidades do local de trabalho. O material é misturado com emulsão asfáltica ou rejuvenescedor para que seja produzida uma nova mistura a frio, adequada para a pavimentação imediata.

✓ **Reciclagem a Frio "in situ"** – O termo reciclagem a frio “in situ” é denominado quando se utiliza processo de fresagem e mistura no local onde se deseja recuperar o pavimento, sendo este processo realizado por equipamento denominado fresador – reciclador. Este método produz uma mistura de novos materiais de construção, em apenas uma passagem do equipamento reciclador.

➤ **Reciclagem de camadas do pavimento (*Full depth reclamation*)** – processo de reciclagem que incorpora as camadas do pavimento com a camada de revestimento asfáltico, com ou sem incorporação de novos materiais, como ligante, cimento, agregado ou solo, produzindo uma nova camada de base estabilizada, usualmente empregada na reabilitação de pavimentos deteriorados. A Figura 2.3 ilustra este processo.

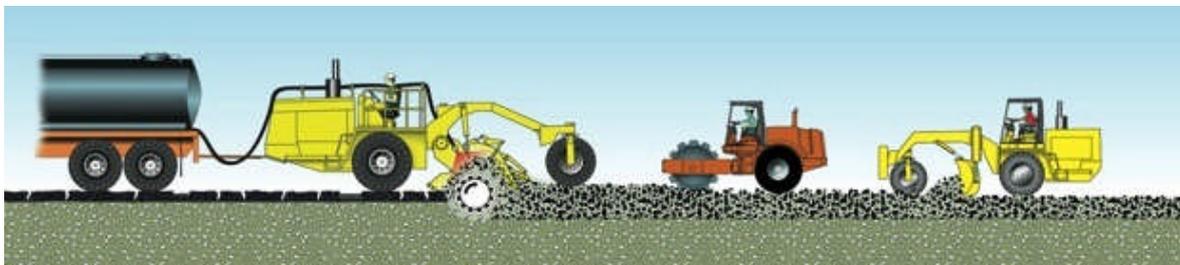


Figura 2.3 – Reciclagem com fresagem profunda ([www.eddhickingbottom.com](http://www.eddhickingbottom.com))

Castro (2003) destaca que os fatores que mais influenciam no comportamento e desempenho do trecho reciclado são a granulometria do fresado, dos agregados adicionais, a temperatura do pavimento, do ar, da emulsão e da água, o teor de emulsão e água adicionada, o tempo de cura e a compactação.

## 2.4 - FRESAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A fresagem de pavimentos asfálticos consiste no corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento asfáltico por meio de processo mecânico a frio, tendo como principal finalidade a remoção de pavimentos previamente à execução de novo revestimento asfáltico.

Dá-se o nome de fresado ao material oriundo de escarificação do pavimento, por meio de equipamento mecanizado, denominado fresadora como a mostrada na Figura 2.4-a. O processo de fresagem pode ser superficial ou profundo, total ou parcial, podendo ser realizado apenas no revestimento asfáltico como também na camada de base. Este processo favorece as técnicas de restauração de pavimento, sendo uma das principais etapas de qualquer processo de reciclagem de pavimentos.

A fresagem reabilita o pavimento danificado que apresenta desgaste ou se encontra envelhecido, sendo o estado geral do pavimento o que determinará como o serviço de fresagem será executado.



Figura 2.4 - (a) Máquina fresadora (b) rolo de corte de uma fresadora (Bernucci *et al.* 2006)

O processo de fresagem altera a granulometria do material retirado em relação à granulometria original do pavimento. Bonfim (2001) comenta que a mudança na curva granulométrica ocorre devido ao processo de fresagem provocar a quebra de parte dos agregados na altura da linha de corte da máquina. Logo, se for extraído o ligante do agregado a granulometria do fresado apresentará uma curva com maior teor de finos e mais fechada se comparada com a curva do material original. Caso não se retire o CAP, o material fresado será composto por grumos que são formados a partir da aglutinação dos finos ao CAP, apresentando assim uma curva granulométrica mais aberta, conforme mostra a Figura 2.5.

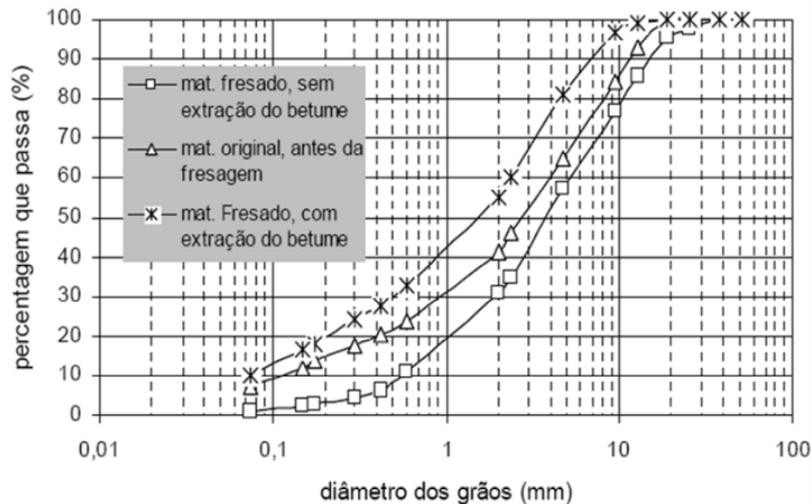


Figura 2.5 - Curva granulométrica do material fresado (Dellabianca, 2004)

A utilização deste tipo de material em uma nova camada asfáltica permite dar uma resposta adequada ao problema cada vez maior de escassez de agregados, bem como atender às exigências ambientais em termos de disposição do mesmo. Além disso, o ligante asfáltico remanescente também apresenta valor econômico elevado, podendo ter recuperadas algumas de suas propriedades físicas e reológicas originais, que durante sua utilização foram comprometidas devido a processos de envelhecimento (Castro, 2003).

A utilização de novos aditivos, emulsões ou rejuvenescedores, atualmente, faz com que este tipo de serviço se torne naturalmente mais econômico em relação à demolição e reconstrução de uma nova mistura betuminosa.

## 2.5 - O MATERIAL FRESADO NO DISTRITO FEDERAL

De acordo com o Núcleo de Orçamento e Custo do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF), foi orçado entre janeiro de 2009 e julho de 2010 uma área de fresagem em torno de 224.917,12 m<sup>2</sup>, sendo a espessura de fresagem em torno de 5 centímetros, obtendo-se um volume de 11.245,86 metros cúbicos de material fresado. Segundo a Diretoria de Urbanização da NOVACAP estima-se que nos últimos anos foi fresada uma área de aproximadamente 1.358.760 m<sup>2</sup> sendo a espessura de fresagem em torno de 5 cm, o que totaliza um volume de 67.938 m<sup>3</sup>, sendo o mesmo destinado às Administrações Regionais, que utilizam este material basicamente como tratamento *anti-pó*.

Atualmente o volume de material fresado estocado nos pátios dos Distritos Rodoviários (DR) do Departamento de Estradas de Rodagem (DER) do DF é de 2.082,49 m<sup>3</sup>, sendo que 1.955,21m<sup>3</sup> estão estocados no 2ºDR e 127,28 m<sup>3</sup> no 3º DR (Figura 2.6). Este volume foi calculado por meio de levantamento topográfico planialtimétrico e processado no programa *Inroads*® de modelagem digital de terreno (Vale & Stemler, 2011).

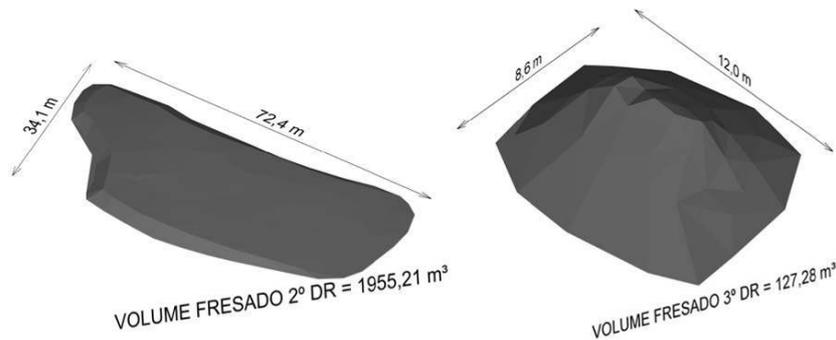


Figura 2.6 - Cálculo do volume de fresado utilizando o software *Inroads*®.

A Figura 2.7 mostra como está depositado o material fresado oriundo dos pavimentos deteriorados do Distrito Federal.



Figura 2.7 - Depósito de fresado no pátio do 2ºDR em 2010.

O Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF) vem utilizando o material fresado nas rodovias do DF de forma empírica, misturando ao material argiloso local o material fresado na proporção de aproximadamente 30% em volume e utilizando esta mistura como camada de base do pavimento a ser construído. Na Figura 2.8-a é possível observar o revestimento em CBUQ construído sobre base de solo+fresado (Figura 2.8-b),.

localizado na marginal da DF 001 em frente à Escola Fazendária, no trecho entre a DF-035 e a DF-463 (Vale & Stemler, 2011).



Figura 2.8 - (a) CBUQ construído sobre base de solo-fresado; (b) Detalhe da base solo+fresado.

Segundo Dellabianca (2004), quando o material fresado é misturado ao solo do DF, o composto obtido em seu estudo, possui um Índice de Suporte Califórnia (ISC) inferior ao que se poderia obter utilizando somente o solo original estudado naquela ocasião.

Outro destino aplicado pelo DER-DF é usar o material como revestimento (Figura 2.9), aplicando-o sobre a base de solo+fresado como o utilizado no núcleo rural Taquara na região de Planaltina DF. Após a base ser imprimada, o material fresado é espalhado com a motoniveladora e então é dado um banho com emulsão asfáltica do tipo RR 1C e seguido de compactação com o rolo liso do tipo CA - 15.



Figura 2.9 - (a) Fresado usado como revestimento; (b) Detalhe do revestimento.

Além destas duas utilizações, o material também foi utilizado na construção de estacionamentos como os realizados no Parque de Exposição de Brasília e como revestimento

primário sobre o subleito em estradas vicinais e denominado como tratamento *anti-pó*. Neste último caso, ocorre apenas o espalhamento do material com a motoniveladora, sem qualquer tipo de adição de ligante asfáltico ou de processos de compactação.

Todo material fresado possui um teor de ligante asfáltico envelhecido, pois quando estava em utilização sofreu os efeitos do tráfego, da temperatura ambiente, do oxigênio do ambiente que foi incorporado nos vazios da mistura, da radiação ultravioleta, da chuva e do tempo, resultando em um aumento da consistência do asfalto e em uma maior rigidez da camada betuminosa.

Este ligante envelhecido, porém, pode ter suas propriedades físicas e reológicas recuperadas, desde que se incorpore a ele um aditivo químico denominado agente rejuvenescedor, que por sua vez é responsável pela reposição das frações leves, óleos maltenos e resinas, conferindo ao ligante rejuvenescido características semelhantes às de um ligante novo.

## **2.6 - LIGANTES ASFÁLTICOS**

Bernucci *et al.* (2006) relatam que a técnica mais utilizada mundialmente para pavimentação é a utilização de revestimentos asfálticos. No Brasil, cerca de 97% das estradas são constituídas por pavimentos flexíveis, sendo o asfalto, o principal componente das camadas de rolamento e até de camadas intermediárias que constituem a estrutura da via. O uso intensivo de asfalto em obras de pavimentação se dá principalmente devido à impermeabilização, durabilidade, flexibilidade e resistência contra a ação de intempéries.

Baseado em dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Souza (2010) descreve que a produção de asfalto brasileiro corresponde, no período compreendido entre o final de 2008 (2.125.959 m<sup>3</sup>) até o final de abril em 2009 (500.200 m<sup>3</sup>), a cerca de 1 a 2% do total de derivados de petróleo produzidos nacionalmente. Isto significa um acréscimo, de aproximadamente 38% para o ano de 2008 em relação à média do período compreendido entre 2000 e 2007.

O ligante asfáltico utilizado em projetos de pavimentação no Brasil, conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), provém da destilação do petróleo, enquadrado de acordo com a

Resolução ANP n.º. 19 e DNIT-EM 095/2006, segundo suas características de consistência e durabilidade.

O Instituto do Asfalto (IA, 2002) caracteriza o CAP como um adesivo pouco reativo, termoviscoplastico, impermeável à água, semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. A baixa reatividade química a muitos agentes, entretanto, não evita que esse material possa sofrer um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água.

Com relação a sua constituição química, a Shell (2003) enquadra o asfalto como uma mistura complexa contendo 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 15% de heteroátomos (oxigênio 0-1,5%, enxofre 0-6%, nitrogênio 0-1% e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes.

A composição química do asfalto tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas, mas varia com o tipo de fracionamento a que se submete o ligante asfáltico. O método mais moderno atualmente empregado, normalizado pela ASTM D 4124-01, separa por cromatografia as seguintes frações, conhecidas como SARA (S de saturados, A de aromáticos, R de resinas e A de asfaltenos) (Leite, 1999; Shell, 2003). Esta separação é feita conforme Figura 2.10 a seguir:



Figura 2.10 - Principais etapas do fracionamento do ligante asfáltico (Souza, 2010)

Existem dois modelos estruturais propostos para o CAP: o modelo elaborado pelo corpo de pesquisadores do SHRP (*Strategic Highway Research Program*) e o modelo de micelas de

Yen. Este último, o mais antigo, considera o ligante asfáltico composto por uma dispersão coloidal de asfaltenos em saturados e aromáticos, conhecidos como maltenos, que por sua vez são imersos em resinas, criando-se assim um equilíbrio moléculas-micelas-aglomerados, mostrado na Figura 2.11.

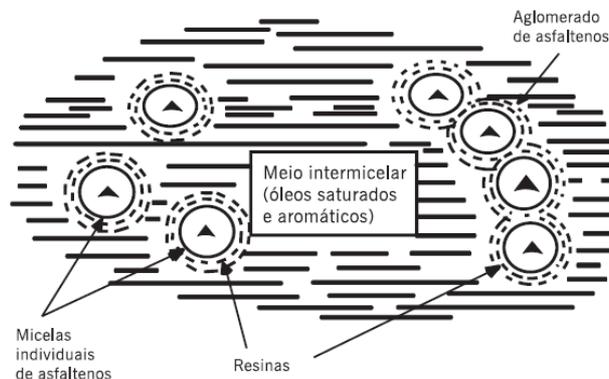


Figura 2.11 - Representação do modelo de micelas de Yen (Leite, 1999)

O equilíbrio deste sistema está intimamente relacionado com as propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico, além de ser extremamente importante na previsão da estabilidade coloidal do asfalto e de sua compatibilidade com aditivos. Gaestel (1971) definiu um índice chamado Índice de Instabilidade Coloidal ( $I_c$ ), para caracterizar o equilíbrio coloidal entre as fases. Este índice é calculado conforme a Equação 2.1.

$$I_c = \frac{S + A}{R + Ar} \quad (2.1)$$

onde: S = saturados, A = asfaltenos; R = resinas e Ar = aromáticos, todos em %.

A baixa temperatura e sob curto tempo de carregamento, o CAP se comporta como sólido elástico, enquanto que a altas temperaturas e longo tempo de carregamento o mesmo se comporta como líquido viscoso. O CAP, portanto, possui grande suscetibilidade tanto à temperatura quanto ao tempo de carregamento, sendo esta uma variável de alta importância no desempenho do pavimento, devendo ser quantificada por ensaios reológicos que determinam as propriedades fundamentais dos materiais (Oda 2000).

Segundo Lima (2003), para se caracterizar os ligantes asfálticos novos ou envelhecidos são utilizados dois métodos. O primeiro e mais utilizado é o convencional, baseado na viscosidade, penetração, ponto de amolecimento, ductilidade, recuperação elástica, ponto de

fulgor e combustão; e o segundo é baseado no desempenho do material de acordo com a metodologia SUPERPAVE.

Motta *et al.* (1996), comentam que a caracterização SUPERPAVE foi desenvolvida pelo SHRP (*Strategic Highway Research Program*) sendo o sistema, baseado no desempenho dos materiais, no clima e na temperatura, especificando os ligantes, agregados e misturas. Nesta caracterização também são feitas considerações relativas ao volume de tráfego e ao tempo de aplicação das cargas para especificar o ligante (SHRP, 1994).

Para se determinar as especificações do ligante pelo método SUPERPAVE são utilizados quatro equipamentos: o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), o viscosímetro rotacional também conhecido como Brookfield, o reômetro de fluência em viga (BBR) e a prensa de tração direta.

Quando se analisa o ligante asfáltico sob um carregamento senoidal como pode ser observado na Figura 2.12, materiais com comportamento viscoelástico como o CAP não apresentam a taxa de deformação em fase com a tensão aplicada. Neste sentido, é necessária a realização de ensaios específicos de modo a definir os valores do módulo complexo ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ), utilizando as seguintes equações:

$$\delta = \omega \cdot \Delta t \tag{2.2}$$

$$G^* = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{m\acute{a}x}} \tag{2.3}$$

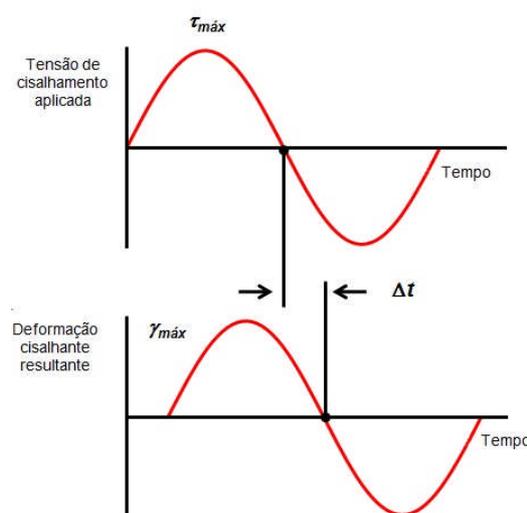


Figura 2.12 - Carregamento do tipo senoidal aplicado ao ligante asfáltico.

O ensaio de DSR é normatizado pela especificação AASHTO TP 5 e está esquematizado na Figura 2.13. Seu funcionamento consiste em aplicar um torque de valor constante em uma amostra de ligante, a uma temperatura pré-determinada, confinada entre duas placas, uma fixa e outra oscilando entre dois pontos. O módulo complexo  $G^*$  calculado neste ensaio é o resultado da máxima tensão aplicada sobre a máxima deformação medida. O tempo de defasagem entre a tensão aplicada e a deformação medida é transformado em ângulo de fase.

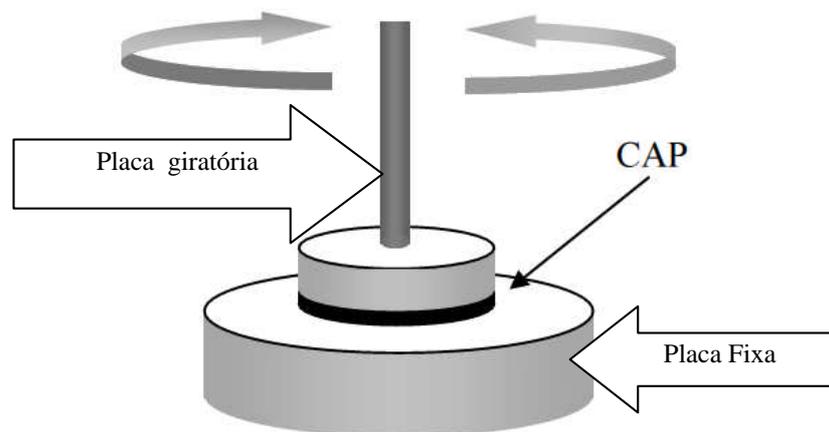


Figura 2.13 – Esquema de funcionamento do DSR.

O módulo complexo ( $G^*$ ) fornece uma medida da rigidez do material quanto às deformações totais - componente elástico (recuperável -  $G'$ ) e outro viscoso (não-recuperável -  $G''$ ), quando exposto a pulsos repetidos de tensões de cisalhamento, representados nas equações 2.3 e 2.4 respectivamente.

$$G' = |G^*| \cdot \cos(\delta) \quad (2.4)$$

$$G'' = |G^*| \cdot \sin(\delta) \quad (2.5)$$

A Figura 2.14-b mostra que ligantes asfálticos podem possuir o mesmo  $G^*$  (A e B) e terem comportamentos diferentes, ou seja, responderem de maneira diferente a uma mesma tensão aplicada. Essa diferenciação é determinada pelos ângulos de fase,  $\delta_1$  e  $\delta_2$ , que decompõem o módulo complexo nas componentes elásticas e viscosas.

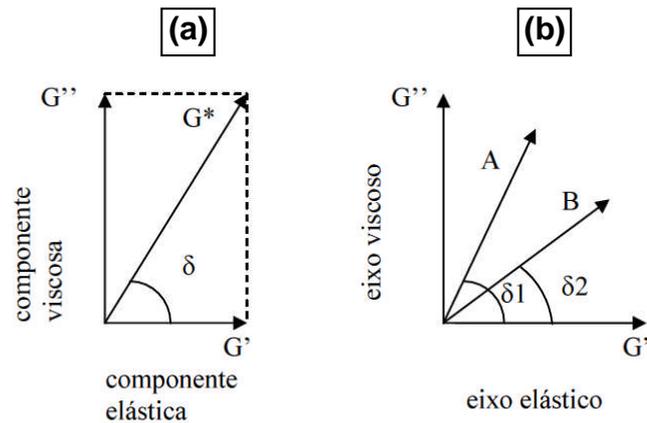


Figura 2.14 - (a) Componentes elástica e viscosa do módulo complexo e (b) ligantes A e B de mesmo módulo complexo e diferentes ângulos de fase,  $\delta_1$  e  $\delta_2$ , respectivamente

O ângulo de fase ( $\delta$ ) permite identificar o comportamento mais elástico (recuperável) ou mais viscoso (não-recuperável) do material além de sua resiliência ou recuperação elástica, ou seja, trata-se da defasagem entre a máxima deformação aplicada e o cisalhamento máximo conforme mostrado na Figura 2.12. Assim, materiais elásticos possuem  $\delta = 0^\circ$  e materiais totalmente viscosos ângulo de fase igual a  $90^\circ$ .

### 2.6.1 - ESPECIFICAÇÕES DAS PROPRIEDADES DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

A seleção e avaliação de um ligante asfáltico envolvem a análise das suas características reológicas, físicas e químicas, pois o ligante geralmente será exposto a uma grande variação de temperatura ( $-20$  a  $\pm 60^\circ\text{C}$ ) e de carregamento, suportando considerável deformação quando submetido a cargas durante um determinado período de tempo.

Dentre os principais procedimentos realizados se encontram os que visam avaliar a consistência e a viscosidade do ligante, além de avaliações das características físicas, de durabilidade, de pureza e de segurança.

No Brasil, o ligante asfáltico mais utilizado em projetos de pavimentação, conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é enquadrado de acordo com a Resolução da ANP n°19 de 11/07/2005 e DNIT EM 095/2006, segundo suas características de consistência e durabilidade que devem se enquadrar nas especificações da Tabela 2.1.

É importante ressaltar que nessa mesma resolução da ANP já foram incorporados ensaios propostos pelo programa SHRP (1994) que deram origem a uma nova metodologia denominada Superpave (*Superior Performance Pavements*). Dentre os ensaios propostos pela Superpave, encontram-se o ensaio de viscosidade Brookfield e o ensaio de envelhecimento na estufa RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*).

Segundo Lucena (2005), estes ensaios surgiram na expectativa de controlar ou eliminar três tipos de falha em pavimentos como as deformações permanentes, trincamento por fadiga e trincamento térmico.

Tabela 2.1- Especificações para ligantes brasileiros (Resolução ANP 19 de 11/07/2005)

Características	Unidades	Limites				Métodos		
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100g,5s,25°C)	0,1mm	30-45	50-70	85-100	150-200	NBR 6576	D 5	ME 003/99
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	42	37	NBR 6560	D36	
Viscosidade Saybolt Furol a 135 °C, mín	S	192	141	110	80	NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 150 °C, mín		90	50	46	36			
a 177 °C		40-150	30-150	15-60	15-60			
ou								
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín		374	274	214	155			
a 150 °C, SP 21, mín.		203	112	97	81			
a 177 °C, SP 21		76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114			
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113	ME 163/98
<b>Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min</b>								
Variação em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, mín (3)	%	65	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

(1) O Índice de susceptibilidade térmica é obtido a partir da seguinte equação:

$$\frac{[500 \times \log(PEN)] + [20 \times (T^{\circ}C)] - 1951}{120 - [50 \times \log(PEN)] + (T^{\circ}C)}$$

Onde:

(T °C) = Ponto de amolecimento; PEN = penetração a 25 °C, 100g, 5 seg.

(2) A Variação em massa, em porcentagem, é definida como:

$$M = (M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}}) / M_{\text{inicial}} \times 100$$

onde:  $M_{\text{inicial}}$  = massa antes do ensaio RTFOT;  $M_{\text{final}}$  = massa após o ensaio RTFOT

(3) A Penetração retida é definida como:

$$PEN_{\text{retida}} = (PEN_{\text{final}} / PEN_{\text{inicial}}) \times 100$$

Onde:  $PEN_{\text{inicial}}$  = penetração antes do ensaio RTFOT;  $PEN_{\text{final}}$  = penetração após o ensaio RTFOT

No Capítulo 3 serão apresentados com detalhes todos os procedimentos adotados nesta pesquisa para avaliar cimentos asfálticos referidos na Tabela 2.1.

## **2.7 - ENVELHECIMENTO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS**

Desde sua fabricação na refinaria até seu último dia de vida em uma rodovia, o ligante asfáltico sofre modificações ao longo do tempo. Estas modificações são refletidas pela alteração de suas características físicas, químicas e reológicas, causando um aumento na sua consistência. Esse aumento de consistência, se exagerado, pode resultar em uma mistura asfáltica mais rígida e mais propícia à fadiga, apresentando menor durabilidade.

Segundo Silva (2005), várias são as reações passíveis de ocorrer nos CAPs, dentre as quais é possível citar: oxidação, endurecimento exsudativo, endurecimento físico e perda de voláteis. O ligante asfáltico utilizado em pavimentação sofre oxidação devido a vários fatores, tais como a presença de oxigênio, exposição à radiação ultravioleta e a variações de temperatura. Segundo Whiteoak (1990), os grandes responsáveis pelo envelhecimento do ligante asfáltico são a oxidação, a perda dos óleos e resinas (voláteis), e o endurecimento físico e exsudativo.

A oxidação é o principal responsável pelo envelhecimento, ocorrendo majoritariamente na etapa de usinagem onde o ligante é revolvido a altas temperaturas de forma que uma grande superfície fica exposta ao ar, chegando a ter um grau de envelhecimento de até 60%. Os outros 40% do envelhecimento acontecem durante o transporte, estocagem e vida útil de serviço.

O endurecimento exsudativo é resultante da migração de componentes oleosos do ligante asfáltico para o agregado mineral a depender das características do ligante e da porosidade do agregado. O endurecimento físico é um fenômeno irreversível que acontece à temperatura ambiente onde ocorre a cristalização de parafinas da fração saturada do ligante asfáltico (Morilha 2004).

Ainda segundo o autor, a perda de voláteis do ligante asfáltico está diretamente ligada à temperatura e às condições de exposição. Esta perda é baixa e considerada de pouca importância no processo de envelhecimento devido aos baixos teores de voláteis encontrados na mistura.

Fisicamente, o envelhecimento de um ligante asfáltico é representado pelo aumento de sua consistência. Ele se apresenta de uma forma geral, como um aumento de viscosidade associado a uma diminuição da penetração e aumento do ponto de amolecimento, com perda de suas características aglutinantes. Esse aumento de consistência influencia o comportamento físico e reológico do ligante asfáltico, deixando-o mais duro e, por conseguinte, mais quebradiço, menos dúctil e menos elástico (Whiteoak, 1990; Pinto, 1991). De acordo com pesquisa realizada por Whiteoak (1990), estas etapas do envelhecimento para o ligante avaliado naquela pesquisa, podem ser ilustradas conforme a Figura 2.15.

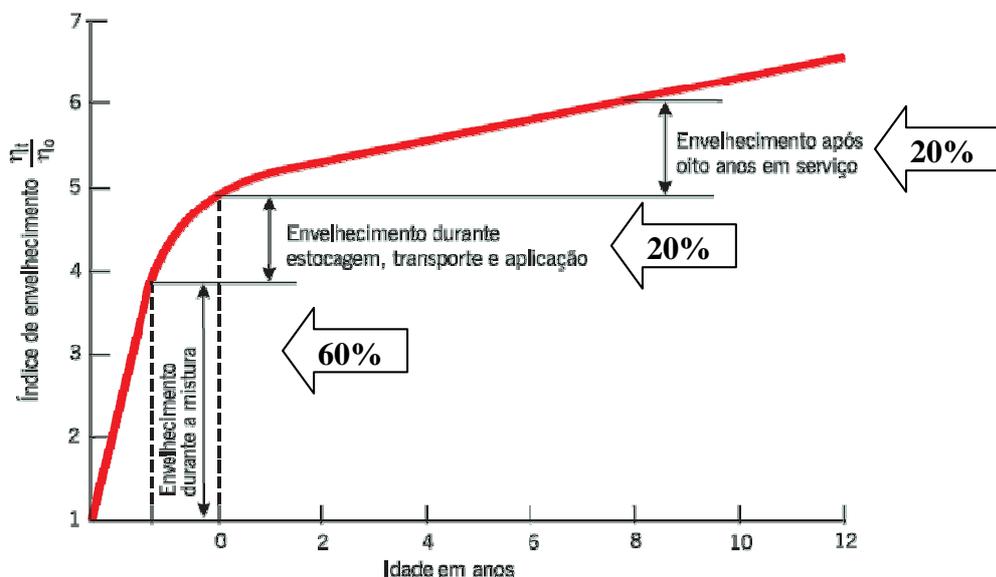


Figura 2.15 Envelhecimento do ligante (Whiteoak, 1990 *apud* Morilha Jr., 2004)

Lamontagne (2002) divide a ocorrência do envelhecimento em três etapas:

✓ **Usinagem** - A primeira fase do envelhecimento acontece durante a mistura onde se processa a fabricação da massa asfáltica, ficando o agregado e o ligante submetido a altas temperaturas (160 – 180°C) na presença de oxigênio, quando ocorre a formação de uma película com espessura de 5 a 15 micrômetros envolvendo o agregado aquecido. Esta etapa faz com que a massa asfáltica saia da refinaria com 60% de envelhecimento. A mistura asfáltica, nesta situação, torna-se menos dúctil e pode apresentar degradação precoce, em forma de trincamento por fadiga e até mesmo por arrancamento dos agregados.

✓ **Espalhamento e compactação** - A segunda fase do envelhecimento acontece durante a estocagem, transporte e aplicação. Nesta etapa o composto fica submetido a altas temperaturas e sua superfície em contato direto com o oxigênio, quando ocorre cerca de 20% do envelhecimento total do ligante.

✓ **Utilização da pista** - A terceira fase do envelhecimento acontece durante a vida útil do pavimento, onde o mesmo está sujeito a uma temperatura mais baixa, porém fica submetido às intempéries e ao tráfego, o que acarreta uma continuação do envelhecimento sendo este 20% do total sofrido pelo ligante asfáltico.

Para se realizar um estudo bem fundamentado sobre o envelhecimento de ligantes asfálticos, é necessária a simulação do envelhecimento de maneira mais próxima possível da realidade. Segundo Silva & Forte (2005) atualmente são utilizadas duas técnicas para simular o envelhecimento de ligantes asfálticos em laboratório.

A primeira, usa o *Rolling Thin Film Oven Test* – RTFOT (ASTM D 2872) mostrado na Figura 2.16-a, e simula o envelhecimento do ligante asfáltico durante o processo de usinagem provocado pelo contato das finas camadas de ligante que envolve os agregados e o ar superaquecido no tambor de mistura. Para simular este envelhecimento, o ensaio é realizado sob altas temperaturas em um forno com compartimento giratório e em presença de oxigênio. A ação giratória do compartimento dentro do forno evita a formação de uma camada oxidada na superfície da amostra assim como a segregação de polímeros, no caso de asfalto modificado.

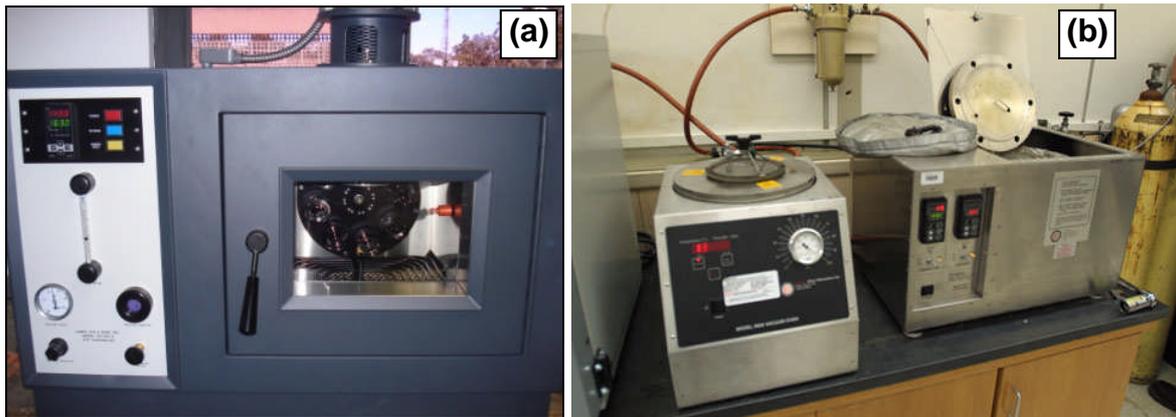


Figura 2.16. (a) Estufa RTFOT para envelhecimento em curto prazo; (b) Estufa PAV para envelhecimento em longo prazo.

A segunda técnica, usa o *Pressure Aging Vessel* (PAV) desenvolvido pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), e simula o envelhecimento do ligante asfáltico *in situ*, ou seja, durante a sua utilização como pavimento (Figura 2.16-b). Este ensaio é realizado sob alta pressão, baixa temperatura e longos tempos, podendo simular o tráfego de veículos durante longo tempo de serviço, combinado com ambiente e intempéries que o revestimento é exposto.

Segundo Silva (2005), a sequência de ensaios RTFOT+PAV é conhecida como uma simulação clássica de envelhecimento e tem sido amplamente utilizada na literatura científica para simular o envelhecimento de ligantes asfálticos. Lamontagne *et al.* (2001) verificaram em seus estudos que uma amostra de asfalto não modificado, exposta à simulação clássica de envelhecimento, possui aproximadamente as mesmas características que um corpo de prova após 3 a 6 anos *in situ*, dependendo da composição química do ligante em questão.

## 2.8 - REJUVENESCIMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Devido ao efeito da temperatura, oxigênio, luz solar, chuva e tempo, o ligante asfáltico tem sua consistência aumentada, promovendo o envelhecimento, ou seja, uma maior rigidez da camada betuminosa. Segundo Thuchumantel (2004), o concreto asfáltico ao envelhecer sofre aumento relativo no teor de asfalto e diminuição no teor de resinas e óleos aromáticos.

Assim, para recuperar as propriedades originais do CAP, principalmente quando se trabalha com a reutilização de misturas asfálticas envelhecidas, utiliza-se uma técnica que visa à reutilização dos agregados e do aglutinante (ligante) do revestimento envelhecido. Para tal é necessária a incorporação de aditivos químicos ao material envelhecido, os chamados agentes rejuvenescedores, que reduzem a viscosidade e repõem as resinas e os compostos aromáticos para que as propriedades originais do ligante sejam restabelecidas (Dellabianca 2004).

Os rejuvenescedores à base de óleo de xisto e à base de alcatrão são os principais produtos disponíveis atualmente no mercado para esta finalidade. Um dos agentes rejuvenescedores é fornecido pela empresa brasileira de petróleo (Petrobrás). Este produto, à base de óleo de xisto, é dividido em duas categorias (a quente e a frio), e regido pelo regulamento técnico DNC 04/97 portaria nº44 de 29/09/1997.

Os agentes a quente são denominados "Aditivos Asfálticos de Reciclagem para Misturas a Quente" (AR) e os a frio recebem o nome de "Agentes de Reciclagem Emulsionados" (ARE). Cada um deles apresenta seis tipos em função da viscosidade do ligante.

Outro agente rejuvenescedor encontrado no mercado brasileiro é o produto a base de alcatrão que foi desenvolvido pela empresa americana PRI (*Pavement Rejuvenation International*), conhecido comercialmente pelo nome de RejuvaSeal®, este é comercializado no mercado nacional pela empresa SPM que se associou à empresa americana.

### **2.8.1 - AGENTES REJUVENESCEDORES A QUENTE (AR)**

O AR é utilizado na recomposição da consistência original do ligante asfáltico presente no revestimento que está sendo reciclado, pois contém compostos aromáticos que visam devolver ao asfalto a característica original de ductilidade e consistência (propriedades reológicas) perdidas pelo envelhecimento ao longo do tempo de serviço do pavimento. Os ARs são asfaltos de baixa consistência, usados em serviços de reciclagem a quente.

A seleção do tipo de AR a ser empregado no serviço de reciclagem dependerá das características de envelhecimento do ligante presente no revestimento a ser reciclado. Quanto

mais envelhecido estiver o ligante asfáltico residual (medido em termos de penetração ou viscosidade) menos consistente deverá ser o AR a ser usado.

Segundo Lima (2003), geralmente obtêm-se valores inadequados da viscosidade do asfalto recuperado, devido a problemas de contaminação pelo solvente utilizado na recuperação do ligante extraído do revestimento asfáltico fresado, influenciando a determinação do teor de AR necessário para rejuvenescer adequadamente do ligante asfáltico envelhecido. O tempo de mistura do AR com outros componentes da mistura também ocasiona perda na eficiência do AR no restabelecimento das propriedades reológicas do asfalto envelhecido, deixando o ligante com viscosidade elevada, influenciando a rigidez final da mistura asfáltica.

Os agentes rejuvenescedores a quente, ARs, especificados pelo regulamento técnico DNC n° 04/97 – Portaria n° 44 de 29/09/1997 são: AR-1, AR-5, AR-25, AR-75, AR-250, AR-500. As especificações destes produtos são apresentadas na Tabela 2.2. A escala de concentração de óleo de xisto é composta por AR-1 (maior concentração) e AR-500 (menor concentração).

Tabela 2.2 - Especificação de rejuvenescedores AR (DNC)

Características	Unid.	Especificações						Métodos	
		AR-1	AR-5	AR-25	AR-75	AR-250	AR-500	ABNT	ASTM
Viscosidade Cinemática a 60°C	cSt	Mín-Máx 50-175	Mín-Máx 176-900	Mín-Máx 901-4500	Mín-Máx 4501-12500	Mín-Máx 12501-37500	Mín-Máx 37501-60000	14756	D2170
Ponto de Fulgor VAC	°C	218	218	218	218	218	218	11341	D 92
Teor de Saturados Massa	%	30	30	30	30	30	30		D2007
Efeito do Calor e do Ar a 163°C (RTFOT ou TFOT)									
Razão de Viscosidade	%	4	4	4	4	4	4	15235 ou 14736	D2872 ou D 754
Varição de Massa	%	4	4	3	3	3	3		
Densidade 20/4°C		ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR	ANOTAR	6296	D 70

VAC: Ponto de Fulgor Vaso Aberto Cleveland

Razão de Viscosidade: Viscosidade a 60°C após RTFOT ou TFOT / Viscosidade a 60°C antes RTFOT ou TFOT

## 2.8.2 - AGENTES REJUVENESCEDORES A FRIO (ARE)

Os Agentes Rejuvenescedores Emulsionados (ARE) são produtos especialmente formulados para serem usados em serviços de reciclagem de pavimento a frio (em usina ou *in situ*). O ARE é usado para recompor a consistência original do ligante asfáltico presente no revestimento que está sendo reciclado, pois contém compostos aromáticos que visam devolver ao asfalto a característica original de ductilidade e consistência (propriedades reológicas) perdidas pelo envelhecimento deste ao longo do tempo de serviço do pavimento. Os ARE são emulsões asfálticas catiônicas formuladas a partir dos ARs.

A seleção do tipo de ARE a ser empregado no serviço de reciclagem dependerá das características de envelhecimento do ligante presente no revestimento a ser reciclado. Quanto mais envelhecido estiver o ligante asfáltico residual (medido em termos de penetração ou viscosidade) menos consistente deverá ser o ARE a ser usado.

Os seis tipos de agentes rejuvenescedores emulsificados, caracterizados em função da viscosidade do ligante são: ARE-1, ARE-5, ARE-25, ARE-75, ARE-250 e ARE-500 conforme mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Especificação dos ARE (Betunel, 2010)

Características	Un.	Especificações						Métodos	
		ARE-1	ARE-5	ARE-25	ARE-75	ARE -250	ARE-500	ABNT	ASTM
Ensaio Sobre a Emulsão									
Viscosidade Saybolt Furol sSF a 25°C	Seg.	70 máx	70 máx	70 máx	70 máx	70 máx	70 máx	14491	244
Sedimentação	% p	5 máx	5 máx	5 máx	5 máx	5 máx	5 máx	6570	6930
Peneiração 0,84mm	% p	0,1 máx	0,1 máx	0,1 máx	0,1 máx	0,1 máx	0,1 máx	14393	6933
Carga da partícula	-	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	6567	244
Destilado Solvente	% v	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula	Nula	6568	6997
Destilado Resíduo	% p	60 mín	60 mín	60 mín	60 mín	60 mín	60 mín	6568	-
Ensaio sobre o Resíduo									
Viscosidade cinemática a 60°C	cSt	50-175	176-900	901-4500	4501-12500	12501-37500	37501-60000	14756	D2171
Teor de Saturados	% p	30 máx	30 máx	30 máx	30 máx	30 máx	30 máx	-	D2007
								15235	D2872
Efeito do calor e do Ar a 163°C									
Razão da Viscosidade	-	4	4	4	4	4	4		
Varição da Massa	% p	4 máx	4 máx	3 máx	3 máx	3 máx	3 máx		

### 2.8.3 - AGENTE REJUVENESCEDOR A BASE DE ALCATRÃO

Pouco depois da Primeira Guerra Mundial, os engenheiros do Exército Americano (USCE), iniciaram uma grande pesquisa para desenvolver uma substância a partir de derivados de petróleo no intuito de melhorar a manutenção de pisos asfálticos.

A década de 1970 foi um período importante para o desenvolvimento de rejuvenescedores à base de alcatrão com o lançamento de um relatório intitulado “Rejuvenescimento de pavimento asfáltico”, mostrando uma significativa melhoria na viscosidade dos ligantes asfálticos testados (Fwa, 2006). Em 1976, um estudo realizado por engenheiros americanos indicou que o uso de rejuvenescedores a base de alcatrão (RejuvaSeal®) prolonga a vida útil do pavimento asfáltico.

No final dos anos 1980, os produtos rejuvenescedores foram recomendados pela FAA (*Federal Aviation Administration*) para o uso em aeroportos. Atualmente o RejuvaSeal® é usado em boa parte do mundo na conservação de auto-estradas, pistas de aeroportos, pátios e portos. Foram realizados vários testes que confirmam que o RejuvaSeal® representa uma alternativa de custo-benefício maior quando comparado com métodos antigos de reconstrução (RejuvaSeal, 2010).

Segundo Mah (2006), o “RejuvaSeal” é um tratamento à base de alcatrão para pavimento asfáltico, proveniente de uma mistura cuidadosa de diferentes materiais e possui duas funções principais: restaurar e proteger o pavimento asfáltico envelhecido. A Tabela 2.4 mostra a composição do agente rejuvenescedor à base de alcatrão.

Tabela 2.4 - Composição do RejuvaSeal (RejuvaSeal, 2010)

Alcatrão	35% – 50%
Destilado de Petróleo	32% – 42%
Rejuvenescedor	15% – 40%

Mah (2006) comenta ainda que as principais ações destes produtos rejuvenescedores à base de alcatrão são divididas em duas etapas:

✓ Reduzir a taxa de envelhecimento do ligante, por meio da selagem e proteção da superfície do pavimento asfáltico, agindo como camada impermeabilizante, resistente à ação da água e de combustíveis;

✓ Estender a vida de uso do pavimento, por meio do rejuvenescimento do ligante asfáltico nas camadas superficiais do revestimento, penetrando nos vazios da mistura e reconstituindo as propriedades de viscosidade e ductilidade do ligante oxidado.

Embora o produto não altere a estrutura do pavimento, o RejuvaSeal supostamente penetra na superfície do pavimento (Figura 2.17), revitaliza o ligante asfáltico e sela a superfície contra contaminantes, como água, combustível e outros produtos químicos (Mah, 2006).

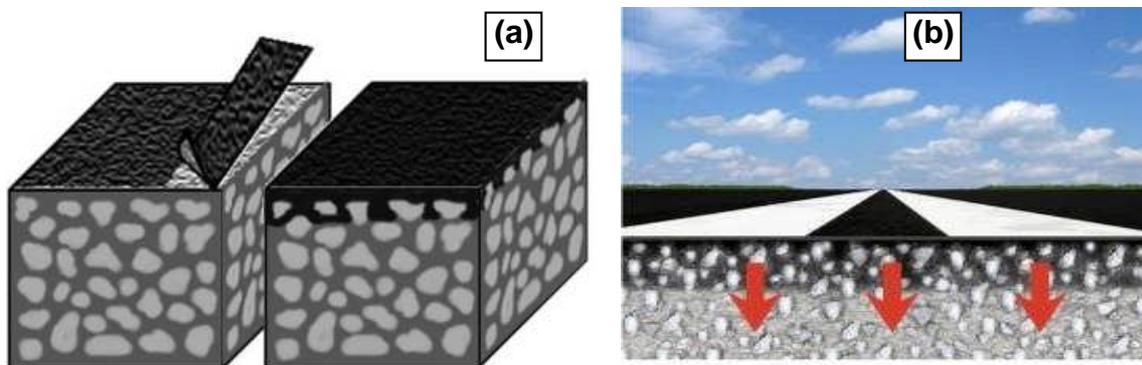


Figura 2.17 - (a) e (b) Mecanismos de interação rejuvenescedor-pavimento.

O RejuvaSeal® é um produto à base alcatrão destilado de carvão, o qual é utilizado como banho selante e rejuvenescedor em camadas de revestimento asfáltico de aeroportos e rodovias. Sua aplicação se dá de forma mecanizada, com controle de vazão computadorizado, capaz de atingir capacidade média, em turno de oito horas, de 5.000m<sup>2</sup>, e tempo médio de cura de três horas, com pavimento seco e sob condições de temperatura superior a 20°C. Segundo Mah (2006), o produto já foi utilizado internacionalmente em vários países, destacando-se muitos estados dos Estados Unidos da América (EUA) (Figura 2.18), Canadá, em várias províncias da China e na Austrália.



Figura 2.18 - Pista de aeroporto no Texas, USA, tratada com RejuvaSeal (Mah, 2006).

Em pesquisa realizada por Fwa (2006), foi observado o comportamento mecânico de corpos de prova revestidos com “RejuvaSeal” submetidos ao ataque de combustíveis, como gasolina e óleo diesel. Como resultado, quando comparados com corpos de prova que não receberam o tratamento selante, verificou-se uma redução da perda de estabilidade Marshall de 50 a 80%, uma redução na perda de Resistência à Tração por compressão diametral de 10 a 30%, além de uma redução na perda de Módulo de Resiliência de 50 a 80%. Esta significativa redução na perda da resistência mecânica após ataque químico sugere que o revestimento proporcionado pelo rejuvenescedor reduz significativamente o efeito nocivo dos combustíveis na mistura asfáltica.

Além desta, uma pesquisa conduzida por Mah (2006) verificou que este tipo de produto reduziu a viscosidade de um ligante envelhecido em até 71% para uma taxa de aplicação de 0,34 l/m<sup>2</sup>, conforme ilustrado na Figura 2.19.

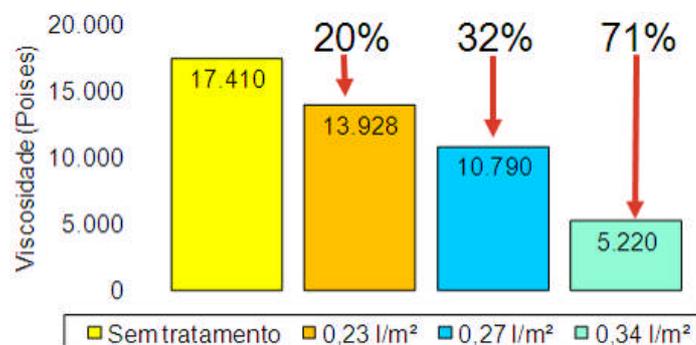


Figura 2.19. Efeito do “RejuvaSeal” na viscosidade de um ligante (Mah, 2006)

Verifica-se, assim, que a aplicação de produtos rejuvenescedores a base de alcatrão pode minimizar o efeito das ações nocivas do intemperismo, além de ataque químico provocado por derramamento de combustíveis no revestimento asfáltico.

No Brasil uma pesquisa realizada por Silva *et al.* (2010), seguindo os mesmos procedimentos de Mah (2006), mostra que corpos de prova revestidos com RejuvaSeal® e submetidos às ações de imersão em água, gasolina, e a combinação destes, apresentaram uma menor perda de resistência à tração e de módulo de resiliência do que as amostras correspondentes sem revestimento. Os resultados dos testes e avaliações estatísticas para a combinação água+gasolina apresentou o maior potencial agressor, seguido da gasolina e por fim o efeito isolado da água.

## **2.9 - EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DO LIGANTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

A extração do ligante é a separação do agregado mineral e do cimento asfáltico de petróleo. Esta separação faz-se necessária quando se quer caracterizar separadamente as propriedades dos materiais componentes da mistura ou obter o teor de cada um. A extração do ligante é feita utilizando procedimentos com o uso de solvente, o qual é posteriormente extraído da mistura (solvente-ligante) para evitar que não haja alterações nas propriedades físicas que se deseja medir. Um dos principais pontos da reciclagem é a extração do ligante envelhecido, pois se faz necessário usar um método de extração e recuperação do ligante envelhecido sem que se alterem as propriedades do ligante.

Segundo Lima (2003), para separar o ligante diluído em solvente do agregado, existem três métodos que são: a extração por centrifugação (rotarex), a extração por refluxo e o método de extração a vácuo que não é muito difundido. Para separar o ligante do solvente existem dois métodos que são: a destilação pelo método Abson e a destilação pelo método Rotavaporador. A extração do asfalto de misturas betuminosas está padronizada na norma americana ASTM D 2172 (extração de asfalto de mistura betuminosa).

### 2.9.1 - EXTRAÇÃO POR CENTRIFUGAÇÃO

Este método de extração por centrifugação do ligante betuminoso consiste em colocar o material fresado dentro de um aparelho denominado *rotarex*, que possui uma cuba metálica cilíndrica acoplada a um motor que a faz girar. É adicionado solvente dentro do cilindro do equipamento e é iniciado o processo de centrifugação, separando o ligante dos agregados.

A extração do ligante deverá seguir às recomendações da norma do DNER ME 053/94 que fixa o modo pelo qual se determina a porcentagem de betume extraído de misturas betuminosas, por meio de extrator centrífugo.

### 2.9.2 - RECUPERAÇÃO DE ASFALTO PELO MÉTODO ABSON

A destilação pelo método de Abson (Figura 2.20), preconizada pela norma ASTM D 1856, é a mais utilizada para se recuperar o ligante da mistura asfáltica, porém este método possui a grande desvantagem de não remover completamente o solvente, não evitando a oxidação do ligante (Lima 2003).

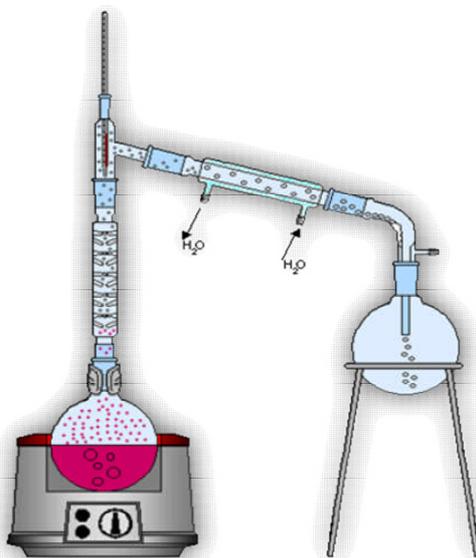


Figura 2.20 - Representação do Destilador de Abson.

Para se utilizar o destilador de Abson, o betume deve ser previamente extraído do agregado de misturas asfálticas de acordo com método de ensaio ASTM D 2172 (método de centrifugação).

Peterson *et al.* (1994) afirmam que ligantes extraídos pelo método de Abson possuem grande coeficiente de variação de 25 a 42% para seus valores de viscosidade absoluta. Lima (2003) também diz que as causas prováveis desta variação seriam principalmente: a presença de solvente residual após o processo de recuperação do ligante que também alteraria suas propriedades físicas e a não extração completa do ligante asfáltico do agregado, deixando asfalto fortemente adsorvido, o que certamente influencia a densidade aparente do agregado recuperado neste processo.

### 2.9.3 - RECUPERAÇÃO DE ASFALTO PELO MÉTODO ROTAVAPORADOR

Com o intuito de tornar o processo de remoção do ligante mais eficiente, o programa SHRP desenvolveu uma metodologia para a extração e recuperação quantitativa de ligante de misturas asfálticas a quente, designado por AASHTO TP2.

Burr *et al.* (1993) afirmam que este novo procedimento consiste na utilização do aparelho Rotavaporador (Figura 2.21), preconizado pela norma americana ASTM D 5404. Esta prática destina-se a recuperar o asfalto de uma mistura usando solvente em um evaporador, onde deve-se primeiro extrair o ligante no equipamento Rotarex. Este processo de recuperação garante que as mudanças nas propriedades do ligante sejam minimizadas durante o processo de recuperação.

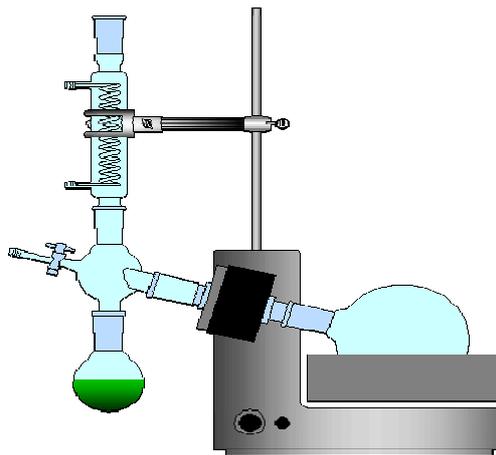


Figura 2.21 - Representação do equipamento Rotavaporador

## 2.10 - AVALIAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

O comportamento e desempenho de um pavimento dependem de dois aspectos: o funcional e o estrutural. O primeiro aspecto está relacionado ao conforto e segurança do usuário e o segundo implica na aptidão da estrutura responder aos esforços solicitantes adequadamente, segundo as prescrições de projeto.

Araújo (2009) descreve que quando necessário, o projeto de reforço de uma estrutura de pavimento no estado de deterioração atual deve ser precedido de uma avaliação estrutural. Esta avaliação refere-se às características de deformabilidade e resistência à ruptura por cisalhamento do sistema em camadas, tornando o comportamento estrutural dos pavimentos uma avaliação complexa. Portanto, para tornar viável uma análise deste tipo, utilizam-se simplificações como a de considerar as camadas granulares da estrutura puramente como sendo compostas de materiais com comportamento elástico linear ou elástico não-linear. Já as camadas de revestimento com misturas asfálticas apresentam comportamento, aproximadamente, visco-elástico. Logo, os deslocamentos gerados pelo tráfego dependem do carregamento, da temperatura e também do tempo de aplicação das cargas.

As deformações em misturas asfálticas possuem componentes recuperáveis (elásticas) e irre recuperáveis (plásticas e viscosas), podendo ser dependentes ou não do tempo. Sides *e. al.* (1985) mostram que a deformação total é então decomposta em quatro componentes conforme indicado na Figura 2.22.

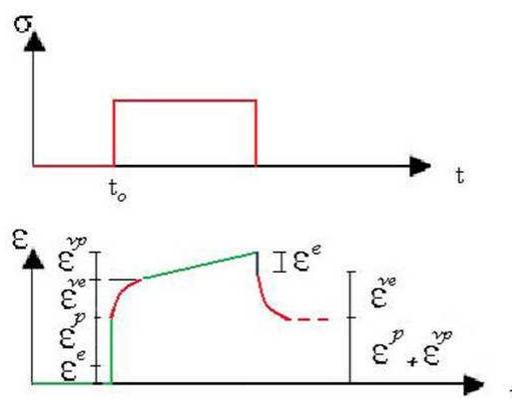


Figura 2.22 - Representação esquemática das deformações em misturas asfálticas.

Essas componentes podem ser escritas como:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{ve} + \varepsilon^{vp} \quad (2.6)$$

Onde:

$\varepsilon$  = deformação total;

$\varepsilon^e$  = deformação elástica (recuperável e independente do tempo);

$\varepsilon^{ve}$  = deformação viscoelástica (recuperável e dependente do tempo);

$\varepsilon^p$  = deformação plástica (irrecuperável e independente do tempo);

$\varepsilon^{vp}$  = deformação viscoplástica (irrecuperável e dependente do tempo).

Dessa maneira, a avaliação do desempenho estrutural de pavimentos flexíveis deve considerar as deformações plásticas (ou permanentes), observadas nos afundamentos das trilhas de roda, ocasionados por dois tipos distintos de solicitações, a compressão que gera a densificação dos materiais constituintes das camadas dos pavimentos, e o cisalhamento que gera movimentos laterais de uma ou mais camadas; e as deformações elásticas ou resilientes ocasionadas pela solicitação cíclica das cargas, que gera as trincas por fadiga.

## 2.11 - METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Segundo Bernucci *et al.* (2006), até 1986 a caracterização das misturas asfálticas, assim como dos outros materiais de pavimentação, eram realizadas estritamente de forma empírica, correspondendo às abordagens de dimensionamento dos pavimentos tal como o método do CBR ou o método da AASHTO. Para dosagem das misturas asfálticas, os ensaios consagrados nessas abordagens foram o de estabilidade Marshall e o de estabilidade Hveem. No Brasil, o ensaio de estabilidade Marshall é ainda extensamente usado, principalmente no meio técnico rodoviário e aeroportuário, devido à facilidade de execução e avaliação dos resultados.

Quando se pretende realizar um dimensionamento de um pavimento baseado em princípios mecânicos, o que se convencionou chamar de método mecanístico, os resultados da análise estrutural dos pavimentos (tensões, deformações e deslocamentos) são comparados com critérios de dimensionamento predefinidos de modo a evitar os principais tipos de defeitos, como trincamento por fadiga e deformação permanente. Para que seja realizada, esta avaliação poderá ser estabelecida a partir de valores limites de resistência dos materiais (Motta, 1991; Benevides, 2000).

No caso de misturas asfálticas, Pinto (1991) comenta que os resultados do ensaio de vida de fadiga têm sido usados com frequência como critério de dimensionamento. As cargas usadas nesse ensaio, por sua vez, são determinadas em função de outro ensaio limite, o de resistência à tração estática, comumente realizada de forma indireta devido à maior simplicidade. Por possuir um modo de falha definido, ele também tem sido usado como parâmetro de controle na dosagem de misturas, em substituição à estabilidade Marshall.

Os ensaios de laboratório são utilizados extensivamente com o objetivo de proporcionar maior entendimento do comportamento mecânico dos materiais utilizados em campo, visto que os ensaios “*in situ*”, ou trechos experimentais são, muitas vezes, de difícil realização. Entretanto, Araújo (2009) comenta que os ensaios de laboratório devem reproduzir tanto quanto possível a situação de campo, isto é, temperatura, tempo de carregamento, níveis de tensão, grau de compactação, etc. Contudo, essas condições sofrem mudanças continuamente em campo, tornando a seleção de condições de ensaio apropriadas uma tarefa não trivial.

# CAPÍTULO 3

## ***Materiais e Métodos***

---

### **3.1 - INTRODUÇÃO**

Neste capítulo são apresentados os materiais que foram usados nesta pesquisa assim como a metodologia e os procedimentos de ensaio executados em laboratório de acordo com as normas e especificações vigentes, além da caracterização e análise da influência de rejuvenescedores no desempenho de misturas asfálticas envelhecidas.

Os materiais básicos usados nesta pesquisa são: o pavimento fresado oriundo das pistas degradadas do DF, os agentes rejuvenescedores, o ligante asfáltico e agregado mineral.

Foram produzidas misturas asfálticas novas e rejuvenescidas. Para confecção da mistura nova, foi utilizado agregado mineral do tipo calcário e ligante asfáltico CAP 50/70. As misturas rejuvenescidas foram produzidas a partir da mistura de material fresado, cujo ligante residual havia sido extraído e avaliado (CAP 20) e adição de agentes rejuvenescedores, na proporção de 15, 20 e 25% em peso em relação ao ligante residual do fresado.

#### **3.1.1 - MISTURA ASFÁLTICA FRESADA**

O material fresado utilizado nesta pesquisa é o produto resultante do desgaste apenas da capa asfáltica. Isso porque um dos propósitos é conhecer melhor o comportamento mecânico desse material, visando sua reutilização sem recomposição granulométrica em obras de pavimentação.

A obtenção do material foi realizada em 2009 da Estrada Parque Indústria e Abastecimento (EPIA), na altura do Viaduto Ayrton Senna, em Brasília-DF (Figura 3.1-a). Este trecho estava sendo submetido ao corte com fresadora a frio do tipo Wirtgen 2100 DC apenas da camada de

revestimento da pista de rolamento, originalmente formada por CBUQ (Figura 3.1-b). Após a fresagem, o material foi estocado no pátio do 2º Distrito Rodoviário do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF).

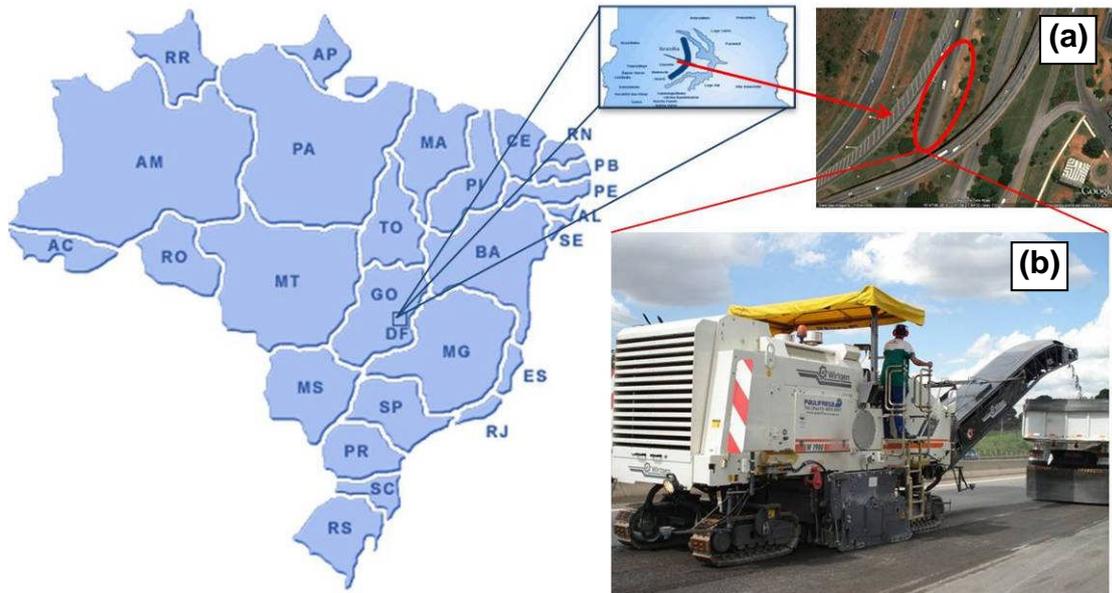


Figura 3.1 - Mapa de Localização do Distrito Federal e o local de obtenção do material: (a) Estrada Parque Indústria e Abastecimento, abaixo do viaduto Ayrton Senna; (b) Processo de fresagem no local

Um dos principais propósitos desta pesquisa foi verificar o comportamento do CAP envelhecido, que à época da construção do revestimento era conhecido como CAP-20, obtido a partir da fresagem do pavimento asfáltico, sendo a ele incorporado agentes rejuvenescedores em diferentes taxas de mistura. Será utilizada a nomenclatura de CAP-20 para representar o CAP envelhecido extraído da mistura asfáltica fresada. A metodologia utilizada nesta etapa será apresentada no decorrer do trabalho.

### 3.1.2 - REJUVENESCEDORES

Quatro rejuvenescedores foram utilizados na pesquisa, sendo três à base óleo de xisto e um à base de alcatrão.

Os agentes rejuvenescedores à base de óleo de xisto são produzidos pela Petrobrás e foram adquiridos junto à distribuidora Betunel Indústria e Comércio Ltda, com sede na cidade do Rio de Janeiro-RJ. Os tipos utilizados nesta pesquisa são: AR-5, AR-250 e AR-500. Estes tipos foram escolhidos de modo a representar as consistências mínima e máxima disponíveis no mercado brasileiro e um ligante com consistência intermediária.

O rejuvenescedor à base de alcatrão não é um produto nacional e é conhecido comercialmente com o nome de RejuvaSeal® e foi adquirido junto ao Grupo SPM, sediado em São Paulo-SP, sendo este grupo responsável pela importação e comercialização do produto no Brasil.

### **3.1.3 - LIGANTE ASFÁLTICO**

Além do ligante (CAP-20) recuperado do material fresado, também foi utilizado um ligante virgem com vistas a estudar o processo de envelhecimento forçado em laboratório, O ligante asfáltico utilizado neste estudo foi o CAP 50/70 obtido na distribuidora de asfalto Centro Oeste Asfaltos Ltda, localizada em Brasília – DF. O CAP desta distribuidora é produzido na REGAP, Refinaria de Betim – MG, e será inicialmente caracterizado de acordo com especificações da Resolução ANP 19 de 11/07/2005.

O uso intensivo do CAP em pavimentação se deve ao fato da forte união com os agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável, grande poder impermeabilizante, além de ser um material durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos.

O CAP é um produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente, líquido a altas temperaturas e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas estabelecidas em especificações que serão mostradas mais adiante. A Figura 3.2 mostra o CAP em seu estado viscoelástico e estado líquido, respectivamente.

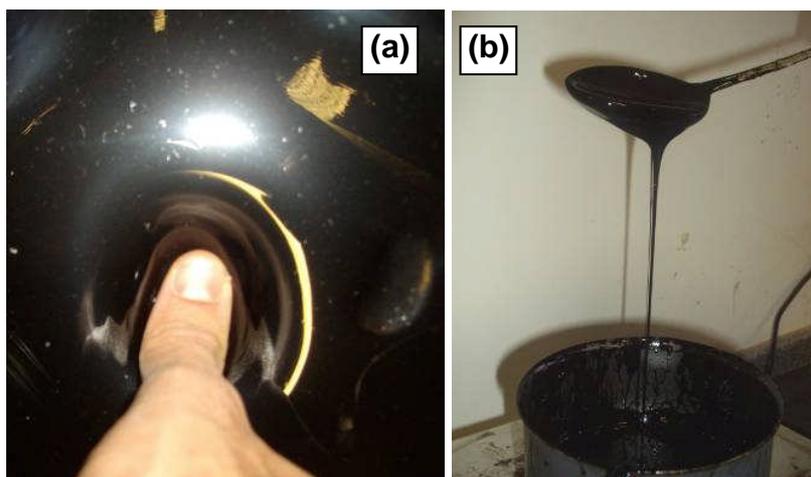


Figura 3.2 - CAP; (a) Estado viscoelástico na temperatura ambiente; (b) Estado líquido a altas temperaturas.

### 3.1.4 - AGREGADO MINERAL

Com relação aos agregados utilizados para confecção de corpos de prova utilizados nesta pesquisa, optou-se por escolher um agregado calcário, conforme ilustrado na Figura 3.3, devido sua predominância e uso intenso em obras rodoviárias do Distrito Federal. Em geral, estes agregados empregados na confecção das misturas asfálticas são caracterizados por apresentarem baixa resistência ao polimento, forma lamelar, porosidade média a baixa, ótima adesividade e excelentes resultados de abrasão Los Angeles.



Figura 3.3 - Agregado Calcário utilizado na pesquisa

## 3.2 - MÉTODOS

Serão apresentados nesta seção a metodologia empregada para seleção e caracterização dos materiais utilizados e posteriormente avaliação do desempenho dos mesmos em misturas asfálticas recicladas. Os resultados obtidos, bem como as considerações acerca das análises realizadas serão apresentados no Capítulo 4.

### 3.2.1 - CARACTERIZAÇÃO E EXTRAÇÃO DO LIGANTE DO FRESADO

Foram retiradas, logo após estocagem, amostras da pilha de material fresado que, posteriormente, foram encaminhadas ao laboratório para execução de ensaios de caracterização, tais como granulometria e percentagem de betume (método Rotarex).

Inicialmente, foi separado o ligante asfáltico envelhecido dos agregados utilizando processo de centrifugação (equipamento Rotarex) e destilação pelo método do Rotavaporador.

O teor do asfalto no material fresado foi determinado conforme equação abaixo (3.1):

$$T\% = \frac{Pa - Pd}{Pa} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:  $Pa$  = peso da amostra antes da extração e  $Pd$  = peso da amostra após a extração.

O procedimento de extração consistiu em adicionar um solvente, neste caso o tricloroetileno, ao material fresado e colocá-lo dentro do equipamento Rotarex, deixando o mesmo girar até que se complete a separação da solução (CAP envelhecido mais solvente), sendo medida sua massa para a determinação do teor de asfalto. Nesta etapa foi realizada também uma filtragem usando um funil de *Buchner* com filtro de papel de  $28\mu$  (micrometro), acoplado a um *Kitasato* ligado a uma bomba de vácuo, a fim de evitar a contaminação do CAP por material fino (*filer*) conforme mostra a Figura 3.4.



Figura 3.4 - (a) Cuba do Rotarex com a mistura fresado-solvente (b) Equipamento Rotarex (c) *Kitasato* e bomba de vácuo (d) detalhe do funil de *Buchner* com filtro

Após separar o ligante dos agregados minerais e do material pulverulento, o mesmo foi levado ao destilador (Figura 3.5) a fim de fazer a separação entre o CAP envelhecido e o solvente (tricloroetileno).



Figura 3.5 - (a) Equipamento Rotavaporador (b) Balão de CO<sub>2</sub>.

Neste processo foi utilizado o método Rotavaporador onde a solução de CAP mais tricloroetileno é colocada dentro de um balão de destilação que fica girando dentro de uma cuba com glicerina aquecida até fazer com que o tricloroetileno evapore. Neste balão foi ainda injetado um gás inerte (dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>), fazendo com que o vapor de tricloroetileno seja expulso para dentro de um condensador onde o mesmo é resfriado e precipitado em outro balão, restando no balão inicial apenas o CAP envelhecido. O uso de um gás inerte para a expulsão do vapor de tricloroetileno faz-se necessário a fim de evitar o aumento da oxidação do ligante envelhecido.

Os procedimentos acima citados estão em conformidade com a norma americana ASTM D 5404 (Recuperação de Asfalto da Solução usando o Equipamento Rotavaporador) salvo algumas adaptações como no caso do uso da glicerina no banho, pois quando se utiliza água como preconiza a norma, não é possível atingir a temperatura suficiente para que o solvente seja evaporado e condensado para sua posterior captação.

Os agregados graúdos e miúdos obtidos após a extração do ligante foram ensaiados no intuito de verificar se os mesmos atendiam às especificações vigentes para camada de rolamento do tipo CBUQ. Os ensaios realizados são os mesmos realizados para o agregado novo, apresentados no item a seguir.

### **3.2.2 - CARACTERIZAÇÃO AGREGADO MINERAL**

A caracterização priorizou o conhecimento da constituição mineralógica dos agregados novos e daqueles obtidos do fresado, bem como das características mecânicas, físicas e geométricas, as quais influenciam na durabilidade e funcionamento de uma mistura asfáltica. Estes ensaios consistiram em:

#### **✓ *Desgaste à Abrasão “Los Angeles”***

Durante o processo de manuseio (carregamento, basculamento e estocagem) os grãos dos agregados sofrem desgaste superficial, quebras e abrasão, ocorrendo também durante a execução de pavimentos asfálticos ou mesmo devido à ação do tráfego. Portanto, eles devem apresentar capacidade de resistir a quebras, degradação e desintegração.

Conforme preconizado pela norma DNER-ME 035/98, as frações de brita 01 e pedrisco foram individualmente submetidas a esse procedimento após terem sido lavadas e secadas em estufa a 105 °C.

Este método consiste em submeter uma determinada massa dos agregados graúdos a um dado número de revoluções, dentro de um tambor girando à velocidade de 30 a 33 rpm, juntamente com um conjunto de esferas de aço padronizadas pela norma (Figura 3.6).

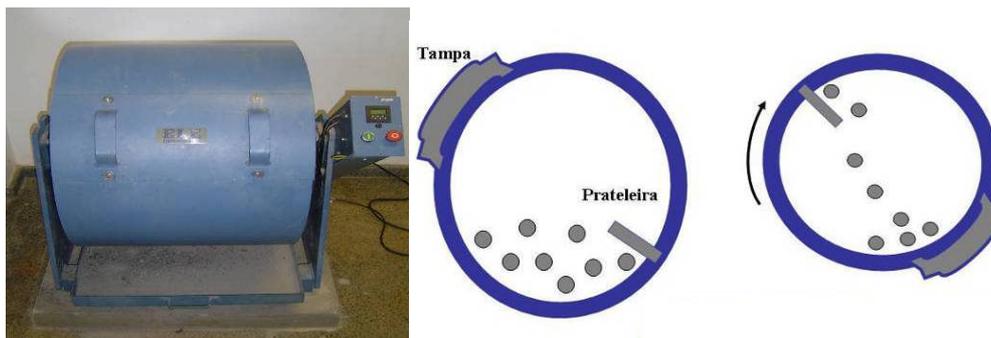


Figura 3.6 - Máquina *Los Angeles*; LER-Ceftru-UnB (Araújo, 2009).

O desgaste é expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa pela peneira de malha quadrada cuja abertura é igual 1,7 mm. Logo após a abrasão *Los Angeles* do agregado é calculada a partir de uma relação entre a massa total seca da amostra colocada no tambor e a massa da amostra lavada e seca, ou seja, como a perda de massa percentual, pela Equação 3.2.

$$A_n = \frac{m_{n1} - m_{n2}}{m_{n1}} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

$A_n$  = Abrasão *Los Angeles* da graduação n, com aproximação de 1%

$n$  = Graduação escolhida para o ensaio

$m_{n1}$  = Massa total da amostra seca, colocada no tambor

$m_{n2}$  = Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7 mm)

A graduação na qual cada material foi enquadrada de acordo com a norma DNER ME035/98, tendo seus resultados apresentados no Capítulo 4.

### ✓ *Densidade e Absorção dos agregados*

A densidade dos agregados é uma medida essencial para que seja possível a determinação de parâmetros volumétricos de uma mistura asfáltica. Em relação à absorção de água, esta medida é utilizada como estimativa da absorção do ligante asfáltico pelo agregado, sendo fundamental para o processo de dosagem da mistura, pois exerce influência direta no consumo de ligante, além da adesividade do par ligante-agregado.

Os ensaios de absorção do agregado graúdo tanto para os agregados novos quanto para os obtidos do material fresado foram realizados seguindo a norma ASTM C 127-01, utilizando grãos retidos em peneira de abertura 4,75mm. No caso do agregado miúdo, foi executado o método de ensaio DNER-ME 194/98 (Frasco de Chapman), em que se utilizou o agregado que passa na peneira de abertura 4,75mm e fica retido na malha de abertura 0,075mm.

A Figura 3.7 ilustra alguns passos do procedimento do ensaio de densidade aparente dos agregados, que consistiu em: (a) secagem dos agregados em estufa, (b) seleção por peneiramento, (c) imersão dos agregados em água por 24h e (d) obtenção dos agregados na condição saturada superfície seca (SSS), condição em que os agregados estão com os poros preenchidos com água (após 24h de imersão), porém a superfície dos grãos está seca. Nesta metodologia a amostra é formada pelos grãos retidos na peneira de abertura 4,75 mm.



Figura 3.7 - Ensaio de densidade de agregado graúdo.

A Equação 3.3 apresenta a fórmula de cálculo da densidade aparente:

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_{sss} - M_{sub}} \quad (3.3)$$

onde:

$D_{ap}$  = densidade aparente;

$M_s$  = massa, ao ar, do agregado seco em estufa;

$M_{ss}$  = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca;

$M_{sub}$  = massa submersa do agregado.

No caso do pó-de-brita de ambos os materiais avaliados (agregado novo e proveniente do fresado), foi executado o método de ensaio DNER-ME 194/98 – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman. Neste método a amostra é formada pelos grãos que passam na peneira de abertura 4,75 mm e ficam retidos na malha de abertura 0,075 mm. O ensaio consiste em colocar uma amostra de 500 g dentro do referido frasco, o qual se encontra com água até a marca de 200 cm<sup>3</sup>, o procedimento de ensaio é ilustrado na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Determinação do peso específica do pó-de-pedra: (a) seleção por peneiramento, (b) pesagem do material, (c) Frasco de *Chapman*; (d) Frasco de *Chapman* após ensaio.

A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco indica o volume ocupado pelo conjunto água e agregado, que é usado para calcular a massa específica real do agregado por meio da Equação 3.4.

$$\rho = \frac{500}{L - 200} \quad (3.4)$$

Onde:

$\rho$  = massa específica real do pó-de-brita (g/cm<sup>3</sup>);

$L$  = leitura no frasco (cm<sup>3</sup>).

O método do frasco de “Chapman” não permite obter o valor do peso específico aparente e da absorção de água. Para o fíler adotou-se o método de ensaio DNER-ME 85/64 - Frasco *Le Chatelier* (Figura 3.1). O procedimento de ensaio é similar ao ensaio realizado com o Frasco de *Chapman*. Embora esta norma recomende expressar o resultado como massa específica, optou-se por apresentá-lo como peso específico.

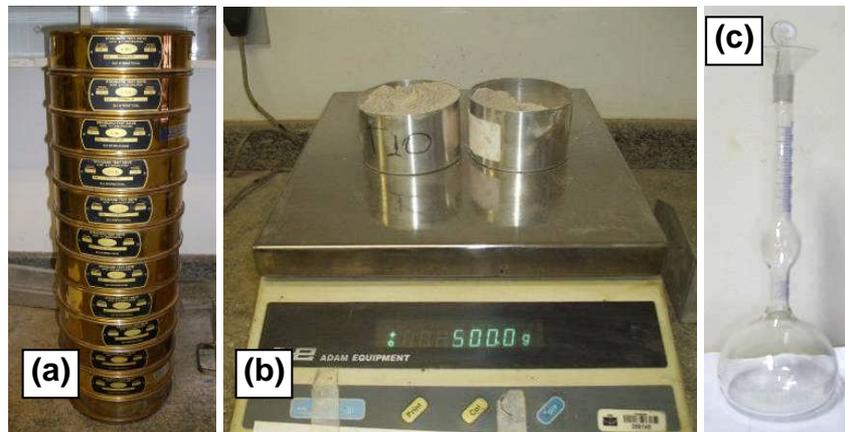


Figura 3.1 – (a) seleção por peneiramento, (b) Determinação do peso específico do fíler; (c) Frasco *Le Chatelier*.

### ✓ *Granulometria*

A análise granulométrica do agregado novo (Figura 3.9-b), assim como daquele obtido do fresado (Figura 3.9-a) foi executada por meio do método de ensaio DNER-ME 083/98, utilizando peneirador mecânico (Figura 3.9-d), disponibilizado pelo LER-CEFTRU/UnB.

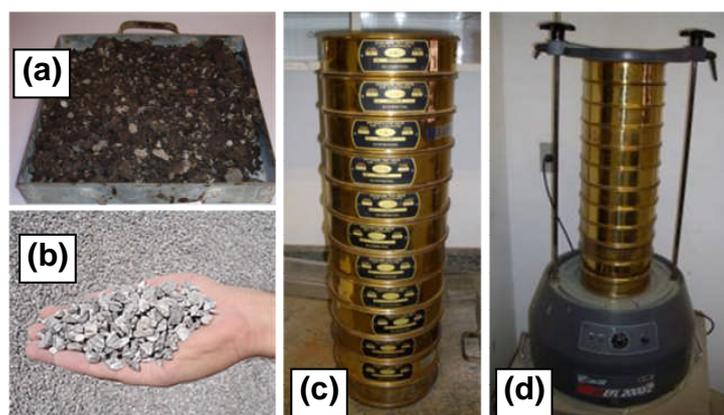


Figura 3.9 – Análise granulométrica dos agregados: (a) material fresado, (b) agregado novo, (c) série de peneiras ABNT, (d) peneirador mecânico.

✓ **Índice de Forma**

Os agregados empregados na confecção da mistura asfáltica do tipo CBUQ devem apresentar um índice de forma superior a 0,5 conforme previsto na Especificação de Serviço do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT 031/2004-ES), determinado pelo método DNER-ME 086/95.

O método fixa o modo pelo qual se determina a variação dos eixos multiderecionais das partículas que compõem os agregados, definindo-a pelo índice de forma. Este método fornece resultados que variam de 0 a 1, o que significa que quanto mais próximo de 1, menor a variação dos eixos e mais cúbico é o agregado. Valores menores que 0,5 indicam grande variação dos eixos e, portanto, partículas lamelares ou alongadas, não sendo recomendadas para misturas do tipo CBUQ.

Para avaliar os agregados graúdos, procedeu-se à execução desse método para cada um dos agregados (novo ou fresado). O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Rodoviária do CEFTRU/UnB. Neste método, após ter sido determinada a granulometria do material, seleciona-se a graduação na qual ele se enquadra. Inicialmente, com a granulometria já determinada, a amostra foi enquadrada em uma das graduações da norma DNER ME 086/94, mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Determinação da graduação do material após análise granulométrica.

Graduação	Crivos de abertura circular mm		Peso das frações da amostra g	Crivos redutores correspondentes mm**	
	Passado*	Retido		Crivo I	Crivo II
A	76,0	63,5	3000	38,8	25,0
	63,5	50,0	3000	32,0	21,0
	50,0	38,8	3000	25,5	17,0
	38,0	32,0	3000	19,0	12,7
B	32,0	25,0	2000	16,0	10,5
	25,0	29,0	2000	12,7	8,5
	19,0	16,0	2000	9,5	6,3
C	19,0	16,0	2000	9,5	6,3
	16,0	12,7	2000	8,0	5,3
	12,7	9,5	2000	6,3	4,2
D	12,7	9,5	1000	6,3	4,2
	9,5	6,3	1000	4,8	3,2

\* Tamanho diretriz

\*\* Abertura em tamanhos comerciais

A seguir, foram quantificadas as frações que constituíram a amostra, utilizando as peneiras com crivos de aberturas circulares. O ensaio consistiu em passar as partículas de cada fração no crivo de abertura igual à metade do tamanho diretriz correspondente (crivo I), separando as partículas retidas e determinando a sua massa. O material passante no crivo I deve ser passado em um segundo crivo redutor de abertura igual a 1/3 do tamanho diretriz da fração (crivo II), anotando-se o peso do material retido. Para cada fração que compõe a graduação, determina-se em relação ao seu peso inicial, as percentagens retidas em cada crivo redutor. O índice de forma é calculado pela Equação 3.5.

$$f = \frac{P_1 + 0,5 \cdot P_2}{100 \cdot n} \quad (3.5)$$

Onde:

$f$  = Índice de forma;

$P_1$  = Soma das percentagens retidas nos crivos I;

$P_2$  = Soma das percentagens retidas nos crivos II;

$n$  = número de frações (ou de tamanhos diretrizes) que compõem a graduação escolhida.

#### ✓ *Adesividade*

O método empregado nesta pesquisa é preconizado pela norma DNER-ME 078/94, o qual consiste em determinar se há ou não deslocamento do filme de ligante em agregado graúdo, após a amostra ser mantida por 72 horas imersa em água a temperatura de 40 °C.

Foi utilizada amostra de 500g de material passando na peneira 19 mm e retido na de 12,7 mm que posteriormente foi lavada e colocada imersa em água destilada por um minuto e em seguida secada em estufa, a 120°C, durante duas horas.

Após este período, o CAP (50-70) foi aquecido a 120°C e paralelamente os 500g de agregado foram aquecidos a 100°C e depois foram misturados a 17,5 g de ligante. Após o resfriamento da mistura, a amostra foi colocada em um recipiente e foi totalmente recoberta com água destilada.

O recipiente foi levado a uma estufa onde permaneceu a uma temperatura de 40°C e mantido em repouso durante 72 h. Após este período, o material é considerado satisfatório se não

houver deslocamento da película de ligante asfáltico ao fim das 72 h, e não satisfatório quando houver deslocamento total ou parcial da película nesse mesmo período. A Figura 3.10 mostra o aspecto de uma amostra antes e após o ensaio, respectivamente.

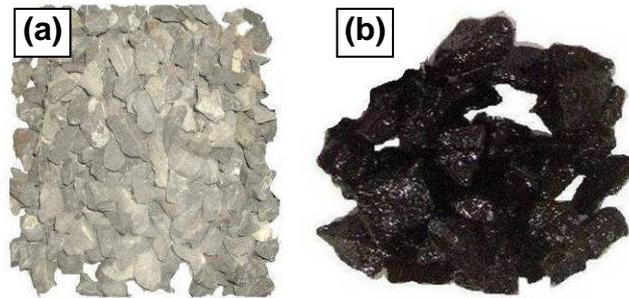


Figura 3.10 - Adesividade do agregado graúdo: (a) antes, (b) após ensaio (Modificado de Araújo, 2009).

### 3.2.3 - CARACTERIZAÇÃO DOS REJUVENESCEDORES

A caracterização dos agentes rejuvenescedores teve como base as especificações do Departamento Nacional de Combustíveis (DNC 04/97 - Portaria 44/97). Foram realizados ensaios de:

✓ **Densidade** – foi realizado seguindo os mesmos procedimentos utilizados para caracterização do ligante asfáltico;

✓ **Viscosidade Cinemática** – a medida de viscosidade cinemática não foi realizada devido à indisponibilidade de equipamento para sua determinação; portanto, o resultado utilizado foi o obtido por meio de laudo técnico que acompanha os produtos adquiridos;

✓ **Ponto de Fulgor, Combustão e Viscosidade Brookfield** – foram realizados seguindo os mesmos procedimentos e normas técnicas de caracterização do ligante asfáltico;

✓ **Simulação do envelhecimento em curto prazo** – Assim como a avaliação do ligante asfáltico, os rejuvenescedores foram levados à estufa RTFOT no intuito de determinação da variação de massa, além e da razão de viscosidade, dada pela Equação 3.6:

$$Razão = \frac{Visc.1}{Visc.2} \quad (3.6)$$

Onde: Visc.1 = Viscosidade a 60°C após RTFOT ; Visc.2 = Viscosidade a 60°C antes RTFOT.

O rejuvenecedor à base de alcatrão, por não ser um produto de origem nacional, não teve algumas de suas características físicas e químicas avaliadas nesta pesquisa, sendo então realizados apenas ensaios básicos de Densidade e Ponto de amolecimento com resíduo após aquecimento a 300°C. As demais informações técnicas sobre o produto foram cedidas pelo fornecedor.

O detalhamento dos procedimentos realizados para caracterização dos rejuvenecedores foram os mesmos utilizados para caracterização do ligante extraído do material fresado e dos ligantes rejuvenescidos, apresentados nos itens que se seguem.

### **3.2.4 - REJUVENESCIMENTO DO LIGANTE EXTRAÍDO DO MATERIAL FRESADO**

Segundo Lima (2003), a quantidade do agente rejuvenecedor a ser incorporado no material deverá estar numa faixa de 0 a 30% do teor total de asfalto existente no material a ser reaproveitado. Merighi *et al.* (2000), entretanto, comentam que inicialmente a adoção deverá ser de 15% do total de ligante do material fresado.

Assim, de posse do ligante envelhecido extraído (CAP-20) do pavimento fresado, foram incorporados agentes rejuvenecedores (AR5, AR250, AR500 e RejuvaSeal®) em quantidades apropriadas 15, 20 e 25%, produzindo os ligantes recuperados relacionadas abaixo:

Tabela 3.2 – Ligantes produzidos a partir de misturas com rejuvenecedores

<i>Agentes</i>	<i>Teores</i>		
AR-5	15%	20%	25%
AR-250	15%	20%	25%
AR-500	15%	20%	25%
RejuvaSeal	15%	20%	25%
CAP 50/70	15%	20%	25%

Para misturar o rejuvenecedor ao ligante envelhecido foi utilizado agitador mecânico Fisatom 713D, com hélice tipo naval (Figura 3.11).



Figura 3.11 - (a) Agitador mecânico; (b) Hélice tipo naval

Inicialmente o tempo, a velocidade de mistura e a temperatura foram de 20 minutos, 1000 rpm e 100°C, respectivamente, mas notou-se uma dificuldade no giro do equipamento devido à viscosidade do material que era elevada. Assim, foi necessário elevar a temperatura a 135°C a fim de obter uma maior homogeneidade da amostra, porém mantendo a velocidade de mistura.

A caracterização do CAP “virgem” foi realizada com o objetivo de verificar se o material encontrava-se dentro das especificações da Resolução n°. 19 da ANP e da norma DNIT 095/2006.

Após a extração do ligante do material fresado, o CAP envelhecido naturalmente foi também caracterizado com a mesma bateria de ensaios do CAP “virgem” ocorrendo o mesmo com as misturas de CAP rejuvenescido. Os teores de mistura foram definidos em porcentagem em massa do CAP envelhecido.

Baseada nas normas e especificações brasileiras, a caracterização do ligante asfáltico foi feita a partir de ensaios correntes para avaliar suas propriedades físicas categorizados entre ensaios de consistência, de durabilidade e de segurança.

### 3.2.5 - CARACTERIZAÇÃO DOS REJUVENESCEDORES E LIGANTES PELO MÉTODO TRADICIONAL

#### 3.2.5.1 - ENSAIO DE PENETRAÇÃO (DNER ME 003/99)

A penetração foi determinada, de acordo com a norma DNER-ME 003/99, utilizando uma agulha sob uma carga pré-estabelecida de 100 gramas, penetrando livremente por 5 segundos sobre uma amostra de material com 50 gramas à temperatura de 25°C. O equipamento utilizado no ensaio está retratado na Figura 3.12.

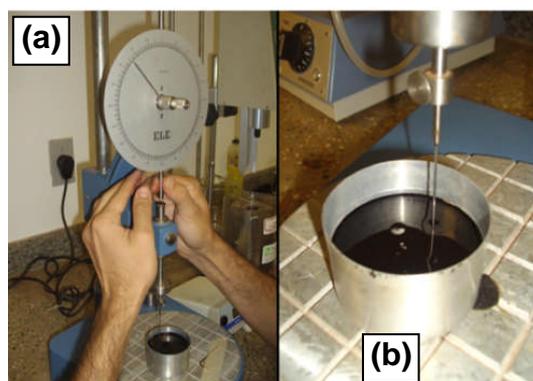


Figura 3.12 - Equipamento utilizado no ensaio de penetração: (a) Visão geral do equipamento; (b) Detalhe da penetração na amostra

Em cada ensaio, três medidas individuais de penetração foram realizadas sempre observando que, cada medida ficou distante mais de um centímetro da borda e entre si. A média dos três valores foi anotada e aceita, quando a diferença entre as três medidas não excederam um limite conforme preconiza a Resolução n°19 da ANP.

Tabela 3.3 Tabela critérios para a indicação de resultados (DNER-ME003/99)

Penetração	0 até 49 (0,1mm)	50 até 149 (0,1mm)	150 até 249 (0,1mm)	> 250 (0,1mm)
Diferença máxima entre o valor mais alto e o valor mais baixo das determinações	2	4	12	20

As determinações de penetração obtidas passaram por prévio tratamento estatístico para então haver a definição de uma média consistente. Nos resultados de penetração, a consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha.

### 3.2.5.2 - PUNTO DE AMOLECIMENTO (DNER ME 247/94)

O ensaio, também conhecido como método do anel e bola, realiza uma medida empírica em que se determina a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição de escoamento. Para tanto é utilizada uma amostra de ligante moldada em um anel de latão mantido suspenso em um banho à taxa de temperatura controlada de 5°C/minuto, onde sobre ele é colocada uma esfera de aço de dimensões e peso especificados no centro da amostra.

No momento em que o asfalto amolece o suficiente para não mais suportar o peso da esfera, ela e o asfalto escoam em direção ao fundo do béquer. O ponto de amolecimento, então, é definido como sendo o valor de temperatura lido no instante em que a amostra toca uma placa de referência do conjunto de ensaio situada a 25,4 mm de profundidade em relação à parte inferior do anel como ilustrado na Figura 3.13.

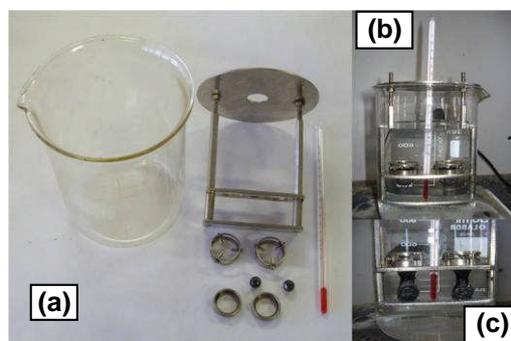


Figura 3.13 - Equipamento utilizado no ensaio: (a) Aparato de ensaio; (b) Amostras em imersão; (c) Ensaio realizado.

Os resultados obtidos para as duas amostras foram avaliadas estatisticamente dentro do limite máximo de 2°C entre as mesmas, conforme preconizado na norma do ensaio.

### 3.2.5.3 - DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE TÉRMICA (IST)

Define-se susceptibilidade térmica como sendo a capacidade que o ligante asfáltico tem de manter suas características reológicas inalteradas sob uma larga faixa de temperaturas. Em climas mais frios, o ligante deve ser mais flexível e aumenta a resistência do revestimento à fissuração e ao trincamento. Em climas quentes, como no caso do Brasil, o maior ponto de amolecimento e a maior viscosidade do ligante aumentam a resistência à deformação permanente.

O Índice de Suscetibilidade Térmica (IST), também chamado de “Índice de *Pfeiffer e Van Doormaal*”, que nas especificações brasileiras pode variar de -1,5 a +1,0, indica a seguinte tendência: valores maiores que +1,0 indicam asfaltos pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços quando a temperatura é baixa; e valores menores que -1,0 indicam asfaltos muito sensíveis a elevadas temperaturas, ou seja, que amolecem rapidamente (Barra, 2005).

De acordo com as normas DNIT 095/2006 e ANP (2005), o IST foi determinado utilizando a equação 3.7:

$$IST = \frac{[500 \times \log(PEN)] + [20 \times (T^{\circ}C)] - 1951}{120 - [50 \times \log(PEN)] + (T^{\circ}C)} \quad (3.7)$$

Onde: T°C = ponto de amolecimento; e PEN = penetração a 25°C, 100g, 5seg.

### 3.2.5.4 - DETERMINAÇÃO DA DUCTILIDADE (DNER ME 163/98)

A avaliação indireta da coesão dos ligantes asfálticos por meio da capacidade do material de se alongar na forma de um filamento antes da sua ruptura é comumente conhecida como “ductilidade”.

Em conformidade com a norma brasileira (DNER-ME 163/98), para se determinar a ductilidade de um material faz-se necessário moldar três corpos de prova e submetê-los a uma tração em um ductilômetro com velocidade constante de  $5 \pm 0,5$ cm/min até que o mesmo se rompa ou atinja o alongamento máximo de um metro permitido pelo equipamento.

Para se moldar o corpo de prova foi necessário aquecer o material até que o mesmo se tornou fluido sendo possível colocá-lo em um molde de latão com um formato de “gravata borboleta”. Após o resfriamento a amostra é aparada com uma espátula a fim de retirar o excesso de ligante, a parte central da forma é retirada sendo a amostra levada ao ductilômetro e colocada em um banho a 25°C. O equipamento é acionado à velocidade especificada, alongando a amostra (Figura 3.14) até que a mesma se rompa ou atinja o alongamento máximo de 1 metro.

A densidade do líquido do banho foi ajustada com Cloreto de Sódio (NaCl) de tal maneira que a amostra ao ser alongada não formasse uma catenária. Cabe ressaltar que para o ensaio utilizando a mistura do RejuvaSeal foi necessário uma quantidade bem maior de sal para se conseguir que a amostra ao ser alongada, ficasse na horizontal. Foram desprezados os resultados quando o valor de um dos corpos de prova ficasse afastado de mais de 10% do valor médio.



Figura 3.14 - Amostras alongadas durante o ensaio de ductilidade.

#### 3.2.5.5 - PUNTO DE FULGOR E COMBUSTÃO (DNER ME 148/94)

A segurança de manuseio do asfalto durante transporte, estocagem e usinagem também é fator importante a ser avaliado durante a campanha experimental de um ligante asfáltico. Para tal, é realizado ensaio de ponto de fulgor, o qual representa a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material asfáltico se inflamam por contato com uma chama padronizada. Valores de pontos de fulgor de CAP são normalmente superiores a 230°C (Bernucci *et al.*, 2006).

Este ensaio foi realizado no intuito de determinar a temperatura em que ocorre um lampejo, devido à inflamação dos vapores da amostra pela passagem de uma chama piloto. A temperatura da amostra é aumentada – de início rapidamente e depois lentamente – a uma

taxa constante na medida em que se aproximava do ponto de fulgor. Em intervalos de tempo especificados, uma pequena chama piloto é passada sobre a cuba. A Figura 3.15 mostra o equipamento utilizado para executá-lo segundo a norma ABNT-NBR 11341/04.



Figura 3.15 - Equipamento para determinação do ponto de fulgor: vaso aberto de Cleveland

### 3.2.5.6 - DENSIDADE DE MATERIAL BETUMINOSO (DNER ME 193/96)

A determinação deste parâmetro tem por finalidade a transformação de unidades gravimétricas em volumétricas e é utilizado no cálculo do volume de vazios da mistura betuminosa. A metodologia empregada é descrita na DNER-ME 193/96, em que o procedimento eleito constitui-se na realização de quatro medidas de peso a uma temperatura de 25°C, conforme esquema representado abaixo na Figura 3.16 e cálculo conforme Equação 3.8.

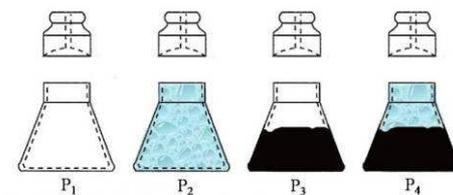


Figura 3.16 - Medidas feitas para determinação da densidade de ligantes asfálticos (Souza, 2010)

$$D = \frac{P_3 - P_1}{(P_2 - P_1) - (P_4 - P_3)} \quad (3.8)$$

Onde: D = densidade do cimento asfáltico; P1 = Massa do picnômetro vazio + Tampa; P2 = Massa do picnômetro com água destilada + Tampa; P3 = Massa do picnômetro com CAP + Tampa; e P4= Massa do picnômetro com água destilada e CAP + Tampa.

### **3.2.6 - CARACTERIZAÇÃO DOS REJUVENESCEDORES E LIGANTES PELO MÉTODO SUPERPAVE**

As propriedades físicas dos ligantes estudados nesta pesquisa também foram medidas segundo as especificações SUPERPAVE, por meio de três aparelhos: reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR – *Dynamic Shear Rheometer*), viscosímetro Rotacional (RVT – *Rotational Viscosimeter*), também conhecido como viscosímetro Brookfield e estufa de filme fino rolado (RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*), ou simplesmente estufa de envelhecimento em curto prazo.

Devido à falta de equipamentos disponíveis no LER-CEFTRU/UnB e nas instituições parceiras desta pesquisa, como reômetro de fluência em viga (BBR – *Bending Beam Rheometer*) e a prensa de tração direta (DDT – *Direct Tension Tester*), não foi possível realizar tais avaliações, sendo todas as análises baseadas no conjunto de dados obtidos nos demais testes.

#### **3.2.6.1 - PERDA DE MASSA – RTFOT (ASTM D 2872/97)**

Após a extração do ligante do pavimento fresado o mesmo foi rejuvenescido com os agentes especificados anteriormente. Para realizar o estudo do comportamento do material rejuvenescido ao ser reaproveitado, existe a necessidade de verificar o novo envelhecimento do CAP. Para simular este envelhecimento em curto prazo (reusinagem) o ligante foi submetido ao *Rolling Thin Fillm Oven Test* (RTFOT), seguindo as recomendações da norma ASTM D-2872/97.

Para a preparação da amostra aqueceu-se o ligante até tornar-se fluido sendo possível inserir  $35 \pm 0,5$  g do ligante em cada frasco de ensaio. As amostras permaneceram em repouso e então foram novamente pesadas a fim de ter uma maior certeza da massa de ligante dentro do frasco, pois já se conhecia a tara do frasco, e em seguida foram levadas para a estufa RTFOT. O frasco foi submetido a giros em uma taxa de 15 rotações por minuto, fazendo com que se formasse uma película fina de ligante na superfície interna do frasco, onde esta ficou submetida a uma temperatura de 163°C e um jato de ar de 4000 ml/min cuja pressão é de 344,74 kPa por um tempo de 85 minutos, conforme mostrado na Figura 3.17. A ação giratória

do compartimento presente dentro da estufa evita a formação de uma camada oxidada na superfície da amostra.



Figura 3.17 - (a) Preparação e (b) Pesagem da amostra; (c) Estufa RTFOT

Decorrido o tempo especificado, os frascos com as amostras envelhecidas foram retirados da estufa RTFOT e colocados para resfriar por um período de mais de 60 minutos. Posteriormente, quando os frascos encontravam-se em temperatura ambiente, foi determinada a massa residual de CAP existente no frasco para que fosse possível verificar a variação de massa, em porcentagem, conforme Equação 3.9.

$$\Delta Massa = \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} \times 100 \quad (3.9)$$

Onde:  $M_{inicial}$  = massa antes do ensaio RTFOT ;  $M_{final}$  = massa após o ensaio RTFOT.

Após o término do ensaio, o ligante envelhecido dentro do frasco de ensaio foi cuidadosamente removido com o auxílio de uma espátula adaptada para a realização do procedimento. Isso permitiu a coleta de material para a realização de ensaios de caracterização reológica do resíduo (RTFOT) como: penetração, ponto de amolecimento, medidas de viscosidades o que tornou possível determinar o aumento do ponto de amolecimento e penetração retida de acordo com a Equação 3.10.

$$PEN_{retida} = \frac{PEN_{final}}{PEN_{inicial}} \times 100 \quad (3.10)$$

Onde:  $PEN_{inicial}$  = Penetração antes o ensaio RTFOT ;  $PEN_{final}$  = Penetração após do ensaio RTFOT

### 3.2.6.2 - VISCOSIDADE APARENTE – BROOKFIELD (ASTM 4402/95)

A viscosidade é a capacidade do fluido de resistir ao escoamento, devido ao atrito formado entre suas camadas. Para a determinação da viscosidade de um CAP pode ser utilizado três métodos de ensaio que são: a viscosidade absoluta, a cinemática e a técnica.

A viscosidade técnica a qual é a mais utilizada no Brasil é obtida utilizando o equipamento Saybolt-Furol, sendo usado somente para estudo do ligante extraído do material fresado. As demais determinações de viscosidade nesta pesquisa foram realizadas pelo método viscosidade aparente (Brookfield).

A viscosidade absoluta (ou aparente) é determinada com o viscosímetro Brookfield, e consiste na razão entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de cisalhamento de um líquido. Esta razão é também chamada de coeficiente de viscosidade dinâmica, cuja unidade utilizada no sistema internacional (SI) é o Pascal-segundo (Pa.s). O centipoise (cP) é equivalente ao milipascal-segundo (mPa.s).

O princípio de operação é medir por intermédio de uma mola calibrada o torque provocado pelo movimento rotacional de um *spindle* (uma espécie de cilindro ou torpedo de alumínio) imerso no fluido para teste. Mede-se a viscosidade em centipoises (cP) e a taxa de cisalhamento em inverso de segundo (1/s). O ensaio pelo método Brookfield deve obedecer ao preconizado na norma ASTM D 4402.

Para determinação da viscosidade, o ligante asfáltico foi aquecido a uma temperatura tal que ele se tornou fluido sendo possível colocar 8 gramas de ligante dentro do tubo de ensaio do equipamento, o qual foi colocado dentro do aquecedor do equipamento. A seguir imerge-se o *spindle* dentro do tubo e então é acionado o equipamento em uma rotação de 20 rpm. O equipamento foi então ajustado para as temperaturas desejadas e ao atingir tal temperatura foram feitas leituras da viscosidade em *centipoise*.

De acordo com a norma brasileira DNER-ME 004/94, para uma melhor definição da curva viscosidade *versus* temperatura, deve ser determinada a viscosidade em temperaturas compreendidas entre 135 e 177°C. A Figura 3.18 mostra o viscosímetro rotacional, modelo DV-II+, acoplado a um controlador de temperatura “Thermosel” que foi usado nos ensaios.



Figura 3.18 - (a) Equipamento de viscosidade Brookfield; (b) Controlador de temperatura.

### 3.2.6.3 - CISALHAMENTO DINÂMICO (DSR)

Com a finalidade de determinar parâmetros viscoelásticos dos ligantes estudados nesta pesquisa (envelhecido, natural e rejuvenescido), foram realizadas medidas de módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) a temperaturas variando entre 46 a 76°C (46, 52, 58, 64, 70 e 76°C) e frequência de carregamentos de 1,59 Hz.

O ensaio consistiu em prensar uma amostra de 25mm de diâmetro (Figura 3.19-c) entre uma placa fixa e outra giratória (Figura 3.19-a). Um torque foi aplicado girando a placa de um ponto A para um ponto B, em seguida para um ponto C, enfim retornando para o ponto A.

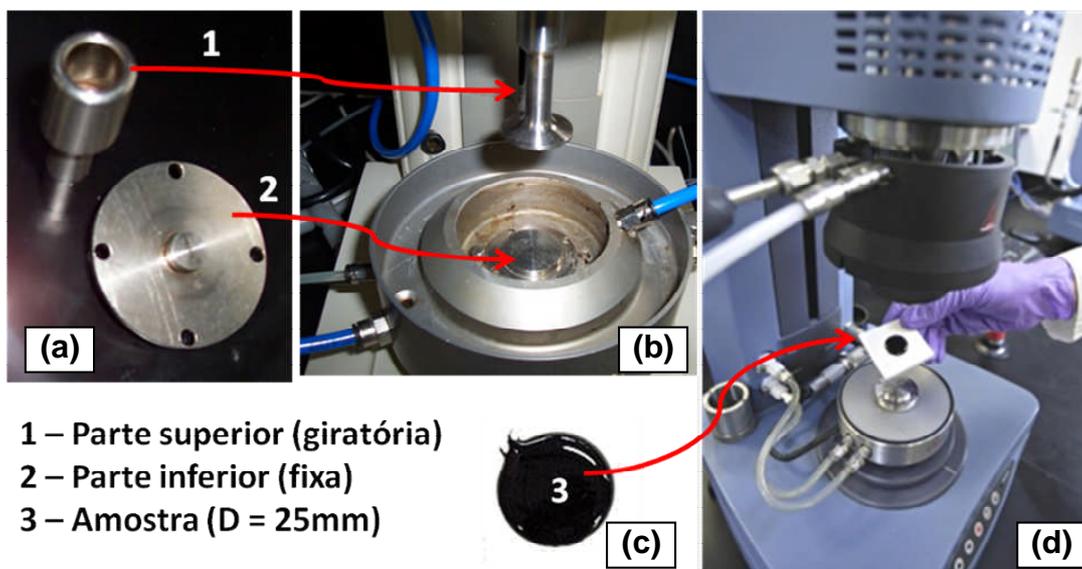


Figura 3.19 – Esquema do ensaio de DSR.

Conforme recomenda a norma, as amostras foram ensaiadas nas temperaturas correspondentes no prazo máximo de 4 horas. Assim, o equipamento realizou as medições, produzindo os valores de módulo complexo e ângulo de fase automaticamente.

### 3.2.7 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Serão aqui apresentados dois métodos para análise da composição química dos ligantes asfálticos envelhecidos que foram modificados com agentes rejuvenescedores.

#### 3.2.7.1 - CROMATOGRAFIA (SARA)

No processo de envelhecimento, tanto de curto prazo (usinagem manuseio e aplicação) quanto no de longo prazo (em serviço) ocorre normalmente uma diminuição do teor de óleos aromáticos, que se transformam em resina que por sua vez se transformam parte em asfaltenos, resultando ao final do processo numa pequena ou nenhuma variação do teor de saturados e resinas, diminuição do teor de aromáticos e aumento no teor de asfaltenos.

Silva (2005) comenta que a cromatografia sobre coluna de sílica IATROSCAN é uma técnica que permite separar diretamente estes constituintes do ligante asfáltico em função de sua polaridade, obtendo-se assim as quatro famílias químicas SARA (saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos) de Corbett (1969). A Figura 3.20 ilustra um cromatograma típico obtido a partir de Cromatografia IATROSCAN.

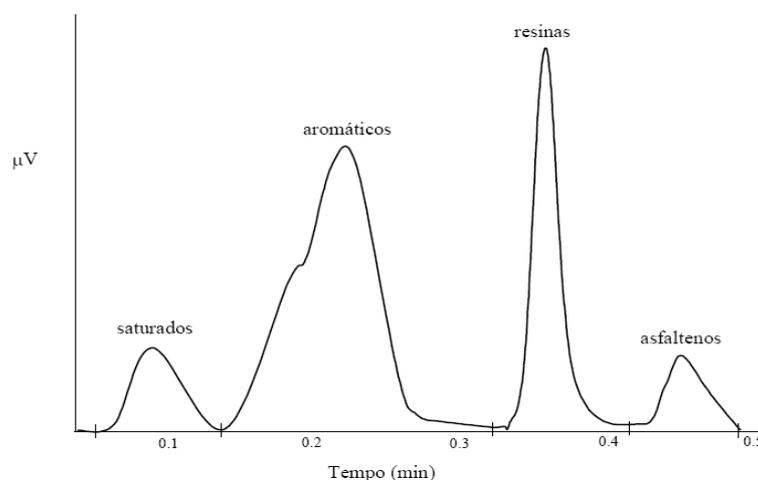


Figura 3.20 - Cromatografia IATROSCAN típico de um ligante asfáltico (Silva, 2005).

A partir do teor de cada fração SARA pode-se monitorar a evolução da composição química do ligante asfáltico envelhecido após mistura com diferentes rejuvenescedores. Também foi determinado o Ic (Índice de Instabilidade Coloidal), a partir do percentual de cada fração química, com base na Equação 2.1, item 2.6.

### 3.2.7.2 - ESPECTROMETRIA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR – RMN

A técnica de ressonância magnética nuclear (RMN) fundamenta-se na determinação de propriedades de uma substância por meio da correlação da energia absorvida contra a frequência em megahertz (MHz) do espectromagnético. Utilizam-se as transições em níveis de energia rotacionais do núcleo componente das espécies (átomos ou íons) contidas na amostra, ocorrendo necessariamente sob a influência de um campo magnético e concomitante sob irradiação de ondas de rádio na faixa de frequências (MHz).

Bringel (2007) comenta que recentemente a ressonância magnética nuclear (RMN) tornou-se um eficiente método para analisar produtos de petróleo, sendo que os espectros (comprimento de onda ou frequência) do CAP geralmente apresentam duas regiões de deslocamentos químicos distintos que correspondem às regiões de alifáticos e aromáticos, este último, mais difícil de analisar devido à grande superposição de picos.

Esta dificuldade é relatada por alguns autores como Shakirullah *et al*, (2006), Jennings & Pribani (1991), que enfatizam esta dificuldade em analisar a região dos aromáticos em espectros de RMN de  $^1\text{H}$  e  $^{13}\text{C}$  dos ligantes asfálticos que se apresentam como uma mistura complexa de compostos orgânicos.

Esta técnica foi utilizada para avaliação das alterações estruturais que a mistura de rejuvenescedores poderia ocasionar no ligante envelhecido que havia sido extraído do material fresado. Pretendia-se verificar se os compostos aromáticos e saturados haviam sido restabelecidos, tomando como parâmetro um CAP novo do tipo 50-70, largamente utilizado em projetos de pavimentação asfáltica na região Centro Oeste do Brasil.

Devido à indisponibilidade de equipamentos nos laboratórios da Universidade de Brasília, optou-se por realizar os ensaios no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES – Petrobrás), com sede na cidade do Rio de Janeiro/RJ.

Estes ensaios tiveram seu andamento acompanhado pela equipe técnica do CENPES/Petrobrás. O equipamento utilizado foi o espectrômetro de RMN marca VARIAN, modelo MR-400 e campo magnético de 9,4T (400 MHz em <sup>1</sup>H).

### 3.2.8 - LIGANTE ENVELHECIDO ARTIFICIALMENTE EM LABORATÓRIO

Após caracterização inicial do CAP, este foi submetido a um processo de envelhecimento controlado em laboratório. A Resolução ANP n°. 19 e a especificação de material EM 095/2006 do DNIT prescrevem limites para perda de massa e relação de viscosidade para avaliar o efeito do calor e do ar sobre o ligante asfáltico.

Para simulação do envelhecimento em curto prazo, foi realizado ensaio com uma estufa do tipo RTFOT. O envelhecimento em longo prazo, geralmente realizado na estufa PAV, não foi realizado.

O modelo de Arrhenius tem sido frequentemente usado para extrapolar dados de curto prazo, para prever o comportamento de um material em longo prazo ou em outras temperaturas (Koerner *et al.*, 1992). Segundo os autores, o modelo é baseado na superposição tempo-temperatura, ou seja, temperaturas de incubação elevadas, definidas de modo a manter a energia de ativação constante, são usadas para acelerar a degradação do material, com o objetivo de extrapolar os dados obtidos para a condição de temperatura de campo. O Modelo de Arrhenius é matematicamente expresso como (3.11):

$$y = a * x + b \rightarrow \ln\left(\frac{1}{t}\right) = -\frac{E_{act}}{RT} + \ln(A) \quad (3.11)$$

Onde:

$y = \ln(1/t)$ , sendo  $\ln$  = Logaritmo natural;  $t$  = tempos de reação ( $\text{min}^{-1}$ );

$a*x = -E_{act}/RT$ , sendo  $E_{act}$  = Energia de ativação aparente (J/mol);  $R$  = Constante universal dos gases perfeitos (8,314 J/mol.K) e  $T$  = Temperatura Absoluta (K);

$b = \ln(A)$ , sendo  $A$  = Fator pré-exponencial ( $\text{min}^{-1}$ ).

Para um dado material, o modelo tem duas constantes ( $E_{act}$  e  $A$ ) a serem determinadas experimentalmente. São realizados, para tanto, ensaios para determinação das propriedades de

amostras envelhecidas artificialmente em no mínimo três temperaturas diferentes, sujeitas a diferentes tempos de exposição ao calor e ao ar.

As propriedades foram testadas em intervalos de tempo com uma escala logarítmica, até um valor-limite estabelecido para que um dado nível de degradação para uma propriedade (viscosidade, por exemplo) fosse atingida para todas as temperaturas utilizadas. De posse dos tempos de reação ( $t_1, t_2, t_3$ ) correspondentes às temperaturas ( $T_1, T_2, T_3$ ), foram plotados gráficos como o ilustrado na Figura 3.21, nos quais os valores de  $1/T$  correspondem às abcissas e os valores de  $1/t$  às ordenadas, ambos em escala logarítmica. Um ajuste linear simples fornece a constante  $E_{act}$  como a inclinação (negativa) da reta e a constante  $A$  como o intercepto com o eixo das ordenadas para  $1/t=1,0$ .

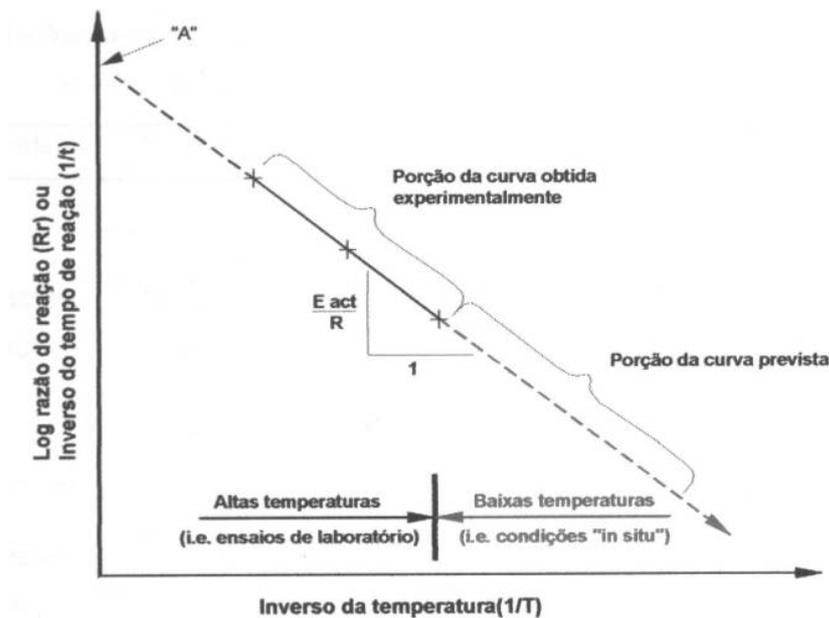


Figura 3.21 - Obtenção das constantes do modelo de Arrhenius.

### 3.2.8.1 - DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES E ENSAIOS

Os ensaios escolhidos para serem realizados no CAP depois de envelhecido devem se relacionar às propriedades que apresentam um significado importante em campo. Os parâmetros mais indicados para a avaliação de mudanças nas propriedades do asfalto são o Módulo Complexo ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ), obtidos por meio do DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) ou Reômetro de Cisalhamento Dinâmico. Entretanto, em função da

disponibilidade de equipamentos no Laboratório de Engenharia Rodoviária, as propriedades escolhidas foram: a diminuição de penetração, o aumento do ponto de amolecimento e o aumento de viscosidade.

Para se ter conhecimento de como estas propriedades se comportavam ao longo de todo o período de teste, a cada tempo pré-estabelecido foi retirado um frasco com resíduo de CAP da estufa para realização dos ensaios.

### 3.2.8.2 - ESCOLHA DOS VALORES LIMITES PARA AS PROPRIEDADES ANALISADAS

Koerner *et al.* (1992) consideram como limite geralmente aceito uma mudança de 50% do valor inicial da propriedade observada. Entretanto, como as normas brasileiras (ANP, 2005) preconizam alguns valores-limite após envelhecimento em curto prazo, o presente trabalho obedeceu a alguns critérios diferentes de acordo com a propriedade investigada. Esses valores-limites foram adotados como critérios de parada para o processo de envelhecimento, conforme mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Valores-limite após envelhecimento em curto prazo

<b>Propriedade</b>	<b>Valor-limite</b>
Aumento no ponto de amolecimento	8°C
Diminuição da Penetração	55%
Aumento da Viscosidade	50%

O processo de envelhecimento foi interrompido quando uma ou mais propriedades entre as selecionadas alcançaram os valores-limites estabelecidos. Isto é, o critério de parada para o envelhecimento do CAP a uma dada temperatura, feito em três campanhas, foi o momento em que o material diminuiu 55% do valor inicial de sua penetração, aumentou 50% do valor inicial de sua viscosidade ou aumentou mais de 8°C do ponto de amolecimento inicial. O teste foi interrompido quando algum destes critérios foi atingido, sendo que os demais critérios teriam então seus tempos-limite extrapolados em função da equação de regressão dos pontos obtidos até o momento de parada.

### 3.2.8.3 - DURAÇÃO DO ENVELHECIMENTO

Conforme preconizado no método proposto por Arrhenius, os intervalos de tempo considerados para envelhecimento das amostras em laboratório visando à obtenção das constantes do modelo foram determinados em escala logarítmica, sendo retiradas da estufa a cada 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 unidades de tempo (horas) e ensaiadas para então verificar seu comportamento ao longo do período de teste.

Desse modo, a determinação dos tempos-limites a que o CAP pode ficar exposto a altas temperaturas, ainda mantendo suas propriedades dentro dos limites da norma, foi feita por meio da observação do comportamento das propriedades reológicas durante o envelhecimento.

### 3.2.8.4 - TEMPERATURAS DE ENSAIO

As mudanças nas propriedades físicas do asfalto devidas ao envelhecimento dependem das temperaturas de ensaio em estufa. Koerner *et al.* (1992) alertam para a possibilidade de as reações químicas a elevadas temperaturas não serem as mesmas a baixas temperaturas, sendo necessário limitar a extrapolação a 40°C abaixo da menor temperatura de incubação em laboratório.

Devido à utilização da estufa RTFOT, cuja temperatura de ensaio é padronizada em 163°C, optou-se por realizar o envelhecimento nas temperaturas de 100; 135 e 163°C (373,15; 408,15 e 436,15K), as quais cobrem uma faixa adequada para estimação do tempo de vida por extrapolação.

## 3.2.9 - MISTURAS REJUVENESCIDAS

Corpos de prova com material fresado foram moldados a fim de verificar qual seria o comportamento mecânico de uma mistura composta por 100% de material reciclado, ou seja, não foram realizadas correções granulométricas, pois o material apresentava granulometria compatível com Faixa “C” de um CBUQ (DNIT 031/2004-ES). Essa mistura recebeu a

incorporação de agentes rejuvenescedores à base de alcatrão e óleo de xisto em diferentes taxas em relação ao peso do ligante impregnado no fresado.

Por meio de ensaios de extração de betume, foi verificado que o material fresado possuía 5% em peso de ligante envelhecido, o que para um corpo de prova de 1200g representa um total de 60g. Sendo assim, adotaram-se as faixas de teor de 15, 20 e 25% de agente rejuvenescedor, correspondendo à incorporação de 9, 12 e 15g, respectivamente, para um corpo de prova de 1200g de material fresado moldado segundo a metodologia Marshall, com 75 golpes por face.

A Figura 3.22, ilustra as etapas de confecção dos corpos de prova mais detalhadamente: (a) mistura manual do agregado com o CAP; (b) colocação do molde na prensa; (c) prensa de compactação Marshall.



Figura 3.22 - Processo de confecção dos corpos de prova

Foram compactadas 10 amostras de material fresado natural, no intuito de ter como base os parâmetros de resistência do material sem incorporação de qualquer agente rejuvenescedor. Estas são consideradas como amostras de referência. Além destes, foram moldados 9 corpos de prova para cada tipo de configuração estudada, conforme mostra a Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Quantidade de corpos de prova moldados

<i>Tipo de Mistura</i>	<i>Porcentagem de aditivo</i>		
	<i>15%</i>	<i>20%</i>	<i>25%</i>
100% Fresado+AR-5	9	9	9
100% Fresado+AR-250	9	9	9
100% Fresado+AR-500	9	9	9
100% Fresado+RejuvaSeal	9	9	9
100% Fresado+CAP	9	9	9

Estas amostras foram utilizadas para verificação da melhor taxa de aplicação em função dos benefícios obtidos para reciclagem do material fresado. Isto observando se, após rejuvenescimento, a mistura atende às exigências mínimas para determinados tipos de projetos de rodovias brasileiras.

Foram determinados parâmetros volumétricos das misturas compactadas a fim de avaliar a eficiência do processo de compactação e quantificar os vazios existentes. Os parâmetros calculados foram: densidade aparente, densidade máxima teórica, porcentagem do volume de vazios e porcentagem de vazios do agregado mineral, além da relação betume-vazios da mistura.

A resistência mecânica também foi determinada no Laboratório de Engenharia Rodoviária da Universidade de Brasília, compreendendo ensaios de Fluência Marshall, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência. Ensaios de fadiga foram realizados em etapa posterior.

#### *3.2.9.1 - AVALIAÇÃO MECÂNICA*

A condição estrutural de um pavimento denota sua adequação ou sua capacidade de resistir mecanicamente às solicitações provocadas pela passagem das cargas do tráfego. Uma condição inadequada ou uma capacidade estrutural insuficiente, para um tráfego atuante, acelerará a geração de defeitos de superfície nas camadas asfálticas, por exemplo, as trincas de fadiga, bem como a queda do nível de serventia com o tempo em decorrência da geração de afundamentos plásticos em trilha de roda e ondulações (Araújo, 2009).

Na presente pesquisa, o comportamento mecânico das misturas foi avaliado por meio dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral a tensão controlada, conforme exposto nos itens seguintes.

### **a) Estabilidade e Fluência Marshall**

Estabilidade Marshall é definida como a resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo corpo de prova, quando moldado e ensaiado de acordo com o processo estabelecido neste método, sendo expressa em N (ou em kgf);

Fluência Marshall é definida como a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação de carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em milímetros (ou em equivalentes em centésimos de polegada).

Ambas as características são determinadas no mesmo ensaio. Os corpos de prova previamente preparados foram imersos em água (banho-maria) a  $60^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$  por um período de 30 minutos. Em seguida, colocados no molde de compressão, convenientemente limpo, e com os pinos-guia lubrificados.

As amostras foram então submetidas ao ensaio até atingir a carga, em N (ou kgf), necessárias para produzir o rompimento. Este valor foi corrigido para a espessura do corpo de prova ensaiado, multiplicando-o por um fator que é função da espessura do corpo de prova, por meio da equação abaixo.

$$f = 927,23h^{-1,64} \quad (3.12)$$

onde: f = fator; h= espessura do corpo de prova.

O resultado assim obtido é o valor da Estabilidade Marshall. O valor da Fluência Marshall foi obtido, simultaneamente ao da estabilidade por meio da leitura do deslocamento, realizada automaticamente pela prensa Multiplex.

### **b) Resistência à Tração**

A resistência à tração indireta estática corresponde à máxima tensão de tração suportada por um corpo de prova quando este é submetido a um carregamento estático de compressão, ao longo do plano diametral, até a ruptura.

O ensaio de tração indireta por compressão diametral, também conhecido como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido por Lobo Carneiro em 1953 com a finalidade de determinar a

resistência à tração de corpos de prova de concreto de cimento Portland por solicitações estáticas. A extensão do uso para misturas asfálticas se deve possivelmente ao fato de os revestimentos asfálticos, quando sujeitos às solicitações do tráfego, desenvolverem tensões de tração por flexão em suas fibras inferiores (Araújo, 2009).

O ensaio é realizado em corpos de prova cilíndricos segundo a norma DNER-ME 138/94 e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, conforme ilustrado na Figura 3.23, a fim de se obter tensões de tração ao longo do diâmetro horizontal, perpendicular à carga.

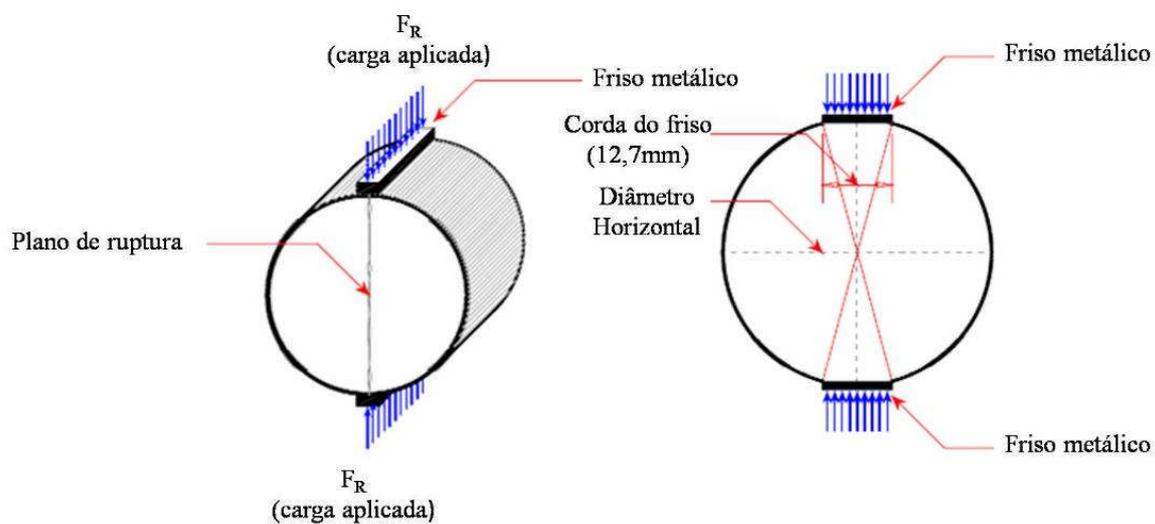


Figura 3.23 - Esquema do ensaio de resistência à tração estática por compressão diametral (DNER-ME 138/94; Souza, 2009)

O ensaio tem por objetivo determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos. Com o valor da carga de ruptura ( $F_R$ ), a resistência à tração do corpo de prova é calculada segundo a Equação 3.13, a seguir:

$$RT = \frac{2F_R}{100.\pi.D_{cp}.h_{cp}} \quad (3.13)$$

Onde:

RT = resistência à tração, MPa;

$F_R$  = carga de ruptura, N;

$D_{cp}$  = diâmetro do corpo de prova, cm;

$h_{cp}$  = altura do corpo de prova, cm.

A aparelhagem necessária à execução do ensaio consistiu em uma prensa mecânica com sensibilidade inferior ou igual a 19,6N (ou 2,0kgf), com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de  $0,8 \pm 0,1\text{mm/s}$  (Figura 3.24). As amostras ficaram em sala climatizada com temperatura em torno de  $25^\circ\text{C}$ , logo após foram medidas utilizando paquímetro digital.



Figura 3.24 - Equipamento do ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral: (a) Visão geral do equipamento; (b) Ruptura de um corpo de prova

Inicialmente foram realizadas medição da altura ( $h_{cp}$ ) do corpo de prova com paquímetro em quatro posições diametralmente opostas, sendo adotada como altura a média aritmética das quatro leituras, e medição do diâmetro ( $D_{cp}$ ) do corpo de prova com paquímetro, em três posições, sendo adotada como diâmetro a média aritmética das três leituras. Os corpos de prova foram mantidos em sala com refrigeração controlada, por um período de duas horas, de modo a se obter a temperatura requerida para o ensaio ( $25, 30, 45$  ou  $60^\circ\text{C}$ ), no presente trabalho a temperatura de ensaio foi a de  $25^\circ\text{C}$ . Foram realizados ajustes dos pratos da prensa até que obtivesse uma leve compressão, capaz de manter o corpo de prova em posição.

As amostras estabilizadas termicamente foram levadas à prensa, onde foi aplicada carga progressivamente, com velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1\text{mm/s}$ , até que se desse a ruptura do corpo de prova segundo o plano diametral vertical; com o valor de carga de ruptura ( $F_R$ ) obtida, foi calculada a resistência à tração do corpo de prova segundo a Equação 3.13. Os resultados obtidos para as misturas analisadas serão apresentados e discutidos no Capítulo 4.

### c) **Módulo de Resiliência**

O ensaio de módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é padronizado no país pela DNER-ME 133/94 (DNER, 1994). Em resumo, pode-se dizer que o módulo de resiliência (MR) de misturas betuminosas é a relação entre a tensão de tração ( $\sigma_t$ ) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável ( $\epsilon_t$ ) correspondente a tensão aplicada, numa temperatura ( $T$  °C), para certa frequência de aplicação de carga (Medina & Motta, 2005; Bernucci *et.al.*, 2006).

A aplicação da teoria da elasticidade a misturas asfálticas no ensaio de compressão diametral, é admissível sob níveis de tensão de tração de 50% ou menos em relação à de ruptura e a temperaturas inferiores a 35°C. Foi atribuído o coeficiente de Poisson de 0,30 para as misturas asfálticas a quente. Para tanto a temperatura utilizada variou em torno dos 25°C (ambiente climatizado) e a carga não ultrapassou o limite de 30% da resistência à tração da carga de ruptura.

Nesta pesquisa, o ensaio de módulo de resiliência (MR) foi executado a temperatura controlada de  $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$  (ambiente climatizado), a temperatura dos corpos de prova durante todos os ensaios de MR foi verificada por meio de sensores de temperaturas num corpo-de-prova de controle. Similar ao ensaio de resistência à tração (RT) foram tomadas as dimensões diametralmente opostas, sendo o corpo-de-prova, em seguida, ajustado no molde (Figura 3.25-b).

Para medição dos deslocamentos horizontais, induzidos pelo carregamento vertical, foram dispostos dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transducers*) em posições diametrais, visando minimizar o efeito de possíveis irregularidades na superfície do corpo-de-prova.

O equipamento utilizado nesta pesquisa (Figura 3.25) foi disponibilizado pelo LER-Ceftru-UnB, que adota os procedimentos especificados na ASTM D 4123/95 e tem capacidade de carga de 12kN.



Figura 3.25 - Equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência: (a) Visão geral; (b) Detalhe do corpo de prova e LVDTs

O procedimento de ensaio realizado neste trabalho consistiu em aplicar 505 pulsos de carga, onde 500 destes referem-se à fase de condicionamento da amostra. O resultado do ensaio corresponde à média aritmética dos últimos 05 pulsos de carregamento, tendo sido fornecido diretamente pelo programa que controla o equipamento. A frequência de carregamento utilizada foi 1s para cada ciclo, correspondendo à aplicação de carga 0,1 s e descanso de 0,9 s.

#### **d) Vida de Fadiga**

Mello (2008) comenta que, particularmente em obras de pavimentação, os revestimentos asfálticos experimentam, usualmente, tensões de tração resultantes das solicitações muito abaixo da tensão última de ruptura, embora o processo repetitivo cause degradações irreversíveis, fenômeno esse conhecido como fadiga.

Segundo Bernucci, *et. al.*, (2006) a vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura ( $N_f$ ) ou vida de serviço ( $N_s$ ). A primeira se refere ao número total de aplicações de certa carga necessária à fratura completa da amostra e a segunda ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível preestabelecido.

Souza (2010) comenta que existem basicamente dois modos para estimativa da vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório: os sob regime de tensão constante ou controlada, e de deformação constante ou controlada. Fritzen *et al.* (2008) afirmam que os ensaios de fadiga quando submetidos à deformação controlada, correspondem a revestimentos mais delgados,

uma vez que nestes há maior contribuição das subcamadas na absorção das tensões solicitantes.

A estimativa da vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório permite a aplicação de carregamentos cíclicos ao material, sob regime de tensão constante ou controlada, e de deformação constante ou controlada. A Figura 3.26-a e Figura 3.26-b apresentam esquematicamente os tipos de solicitações, deformações controladas e tensão controlada respectivamente.

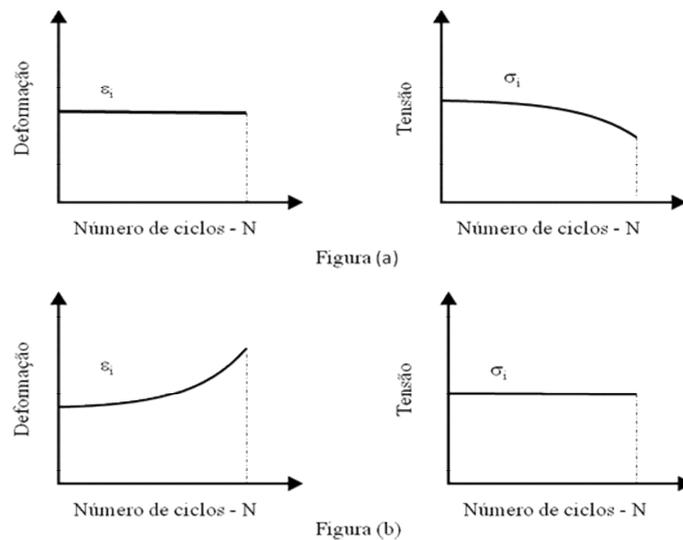


Figura 3.26 - Representação dos tipos de solicitações (Pinto, 1991).

Em quaisquer das condições de ensaio a vida de fadiga é expressa pelo número de solicitações (N), relacionado à tensão de tração ( $\sigma_i$ ) ou a deformação inicial de tração ( $\epsilon_i$ ) em gráficos mono-log, empregando-se a Equação 3.14 ou Equação 3.15 para ensaios a deformação controlada ou tensão controlada, respectivamente.

$$N = k_1 \left( \frac{1}{\epsilon_i} \right)^{n_1} \quad (3.14)$$

Onde:

N = vida de fadiga;

$\epsilon_i$  = deformação resiliente inicial (cm);

$K_1, n_1$  = parâmetros experimentais (determinados no ensaio).

$$N = k_2 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad (3.15)$$

Onde:

N = vida de fadiga;

$\Delta\sigma$  = diferença de tensão (MPa);

$k_2, n_2$  = parâmetros experimentais (determinados no ensaio).

Tradicionalmente o ensaio laboratorial de vida de fadiga realizado no país para definição do número de repetições de carga é feito por compressão diametral à tensão controlada (TC), sendo a carga aplicada numa frequência de 1 Hz, ou seja 60 aplicações por minuto, por meio de equipamento pneumático (Pinto, 1991; Medina & Motta, 2005; Fritzen *et al.*, 2008). Pode-se considerar que o ensaio em compressão diametral gera um estado biaxial de tensão em um corpo-de-prova cilíndrico Marshall convencional. No decorrer do ensaio de fadiga, a deformação de tração aumenta até o rompimento completo do corpo-de-prova, como pode ser observado na Figura 3.26-b.

Embora ainda não normatizado, o ensaio de fadiga tem sido largamente realizado no país, geralmente à compressão diametral sob tensão e temperatura controladas. A fadiga na camada de revestimento ocorre devido à aplicação de um carregamento solicitando dinamicamente o pavimento, despertando uma tensão de tração ( $\sigma_t$ ) na face inferior do revestimento betuminoso e provocando a ruptura do mesmo após, a n-ésima aplicação da carga, considera-se, geralmente, a carga proveniente do “eixo simples padrão” de 8,2 tf.

Para a estimativa da vida de fadiga, inicialmente é calculado o carregamento vertical a ser aplicado em função de uma percentagem da carga de ruptura, utilizando-se a Equação 3.16.

$$F_v = \frac{100 \times \pi \times D_{cp} \times h_{cp} \times \sigma_t^*}{2} \quad (3.16)$$

Onde:

$F_v$  = Carga vertical aplicada (N);

$\sigma_t^*$  = Tensão de tração, correspondente a uma porcentagem da resistência à tração (MPa);

$h_{cp}$  = Altura do corpo de prova (cm);

$D_{cp}$  = Diâmetro do corpo de prova (cm).

As diferenças de tensões e de deformações resilientes são obtidas pela Equação 3.17 e Equação 3.18, respectivamente.

$$\Delta\sigma = \frac{8F_v}{100 \times \pi \times D_{cp} \times h_{cp}} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{MR} \quad (3.18)$$

Onde:

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

$\varepsilon_i$  = deformação resiliente (mm);

MR = módulo resiliente (MPa).

Neste trabalho, o ensaio realizado para estimar a vida de fadiga consistiu na aplicação de pulsos de carga, de *forma haversine*, com frequência de 1s, sendo 0,1s correspondentes ao tempo de aplicação da carga e 0,9s correspondente ao tempo de descanso. Os carregamentos utilizados foram 30%, 40% e 50% da resistência à tração referente a cada mistura asfáltica avaliada. Foram realizados ensaios sob tensão controlada, cujo critério de fadiga está associado à fratura total da amostra. Em geral, a vida de fadiga (N) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à ruptura total da amostra, em condições térmicas em torno de  $25 \pm 0,5$  °C. O critério de parada utilizado, nesta pesquisa, foi a ruptura total do corpo-de-prova. O equipamento utilizado foi o mesmo do ensaio de Módulo de resiliência, mostrado na Figura 3.27.



Figura 3.27 - Ensaio de fadiga em andamento

### 3.2.9.2 - AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A finalidade da caracterização ambiental dos resíduos é verificar a capacidade de lixiviação e de solubilização dos produtos utilizados na recuperação do ligante asfáltico betuminoso, uma vez que, tais produtos ao serem aplicados estarão em contato direto com o meio ambiente e sujeito às intempéries.

Quando a água da chuva entra em contato com substâncias que estão sobre a camada superficial dos solos, carrega consigo substâncias na forma dissolvida (solutos) em direção às regiões mais profundas do solo, geralmente, rumo ao aquífero freático. Esse processo de transporte de solutos (que podem ser nutrientes, poluentes, e outras substâncias dissolvidas) rumo às camadas mais profundas do solo é denominado lixiviação. A Figura 3.28 ilustra esse processo.



Figura 3.28 – Exemplo de processo de lixiviação.

Segundo Hendriks *et al.* (2007), os hidrocarbonetos presentes nas misturas asfálticas não sofrem lixiviação com facilidade, mas deve-se tomar cuidado quando o asfalto velho for aquecido, pois podem liberar hidrocarbonetos que afetam a saúde humana, principalmente daqueles que lidam diretamente com o material.

Devido ao fato de os hidrocarbonetos saturados dificilmente sofrerem mudanças com o tempo recomenda-se investigar o teor de hidrocarbonetos no betume quando for reciclar o material a quente (Hendriks *et al.*, 2007).

Sendo assim, análises de cunho ambiental foram realizadas com o intuito de se avaliar com maior precisão a periculosidade do resíduo, bem como sua mistura com agentes rejuvenescedores com diferentes características estudados nesta pesquisa. A caracterização ambiental das amostras foi realizada seguindo os critérios das normas brasileiras NBR 10004 – Resíduos Sólidos: Classificação, NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos e NBR 10006 – Solubilização de Resíduos 10007 – Amostragem de Resíduos.

Os ensaios de análise ambiental não foram realizados na UnB, mas pela AMPRO Laboratório, sediada na cidade de Lorena-SP, tendo como responsável o Engenheiro Químico Marco Antonio Souza Vieira.

Devido ao fato de que este tipo de análise só pode ser feita com resíduos sólidos, não seria possível encaminhar os rejuvenescedores isoladamente para avaliação dos critérios de lixiviação e solubilidade. Assim, optou-se por encaminhar amostras do tipo CBUQ preparadas com material fresado contendo porcentagens de rejuvenescedores iguais às propostas na pesquisa, ou seja, 15, 20 e 25% em peso do ligante residual presente no fresado utilizado.

Face às dificuldades e custo para a realização dos ensaios ambientais, foram escolhidos apenas três amostras dos materiais utilizados na pesquisa:

- Material Fresado Natural – Material que deu origem à pesquisa e não se tinha um conhecimento sobre os efeitos deste material sobre o meio ambiente;
- Material Fresado + AR-500 – Material a base de óleo de xisto e dentre os ARs utilizados o que apresenta maior concentração de óleos leves, tendo o corpo de prova enviado para a análise um teor de 25% de AR 500 sendo esta a situação mais desfavorável;
- Material Fresado + RejuvaSeal – Material a base de alcatrão e também desconhecido o seu impacto sobre o meio ambiente tendo o corpo de prova analisado com teor de 25% de RejuvaSeal.

A avaliação ambiental dos materiais servirá como subsídio para a tomada de decisão quanto à destinação final apropriada para o resíduo.

### 3.2.10 - EFEITO SELANTE DE AGENTE REJUVENSCEDOR

O principal objetivo desta etapa foi identificar se a aplicação do rejuvenescedor à base de alcatrão, comercialmente conhecido como “RejuvaSeal”, gera benefícios para a mistura asfáltica. O procedimento experimental consistiu em compactar 32 corpos de prova de CBUQ dentro da faixa granulométrica “C” do DNIT, em que foi determinada em laboratório, por meio de estudo de dosagem, uma porcentagem de 5% de asfalto em relação ao peso total do corpo de prova.

Conforme estudos realizados pela Fwa (2006), os corpos de prova foram submetidos a testes de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência, em que metade deles foram revestidos com RejuvaSeal e curados por 24 horas em sala climatizada com controle de temperatura. A totalidade da população foi submetida a processos agressivos para o asfalto como imersão em gasolina (25°C) e água a temperatura constante de 60°C, cada um deles por um período igual a 4 horas. A seguir serão apresentados com detalhes os processos de preparação das configurações ensaiadas.

#### 3.2.10.1 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Todos os corpos de prova foram confeccionados segundo a metodologia Marshall, com diâmetro de 100 mm e altura igual a 63,5 mm, com a granulometria apresentada na Figura 3.29, tendo como referência os limites da faixa C da ES-031/2004 (DNIT, 2004).

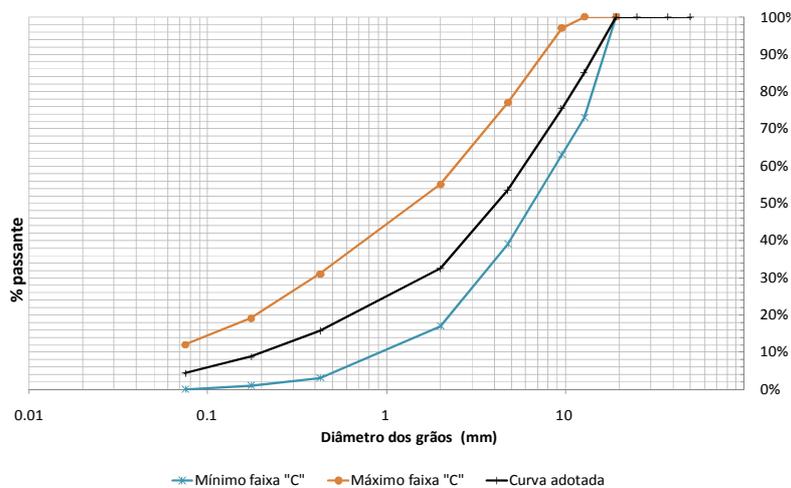


Figura 3.29 - Faixa Granulométrica dos corpos de prova

Cada corpo de prova pesava o total de 1200 gramas, dos quais 1140 g foram correspondentes a fase agregado graúdo, miúdo e *filler*, e 60 gramas de ligante asfáltico, os quais foram compactados a uma temperatura de 150°C. No total, 32 amostras foram compactadas, permanecendo em repouso por 24 horas, protegidos por um saco plástico numa sala com temperatura controlada (25°C) antes de qualquer outro procedimento. A Figura 3.30 ilustra o processo de confecção das amostras.

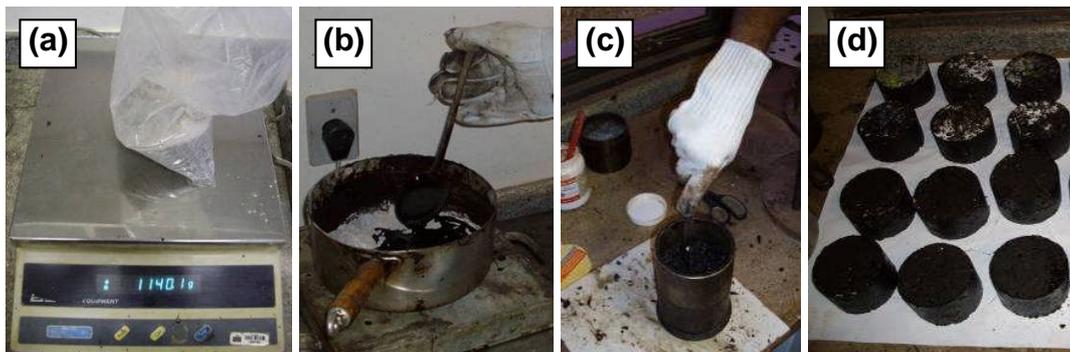


Figura 3.30 - Preparação dos corpos de prova: (a) Pesagem; (b) Mistura; (c) Preparo para compactação; (d) Após compactação

### 3.2.10.2 - REVESTIMENTO SUPERFICIAL

Das 32 amostras, 16 foram revestidas e 16 avaliadas sem revestimento. Conforme recomenda CCEL (2006) em estudo realizado em Hong Kong, a aplicação do revestimento com o RejuvaSeal foi realizada 24 horas após a compactação dos corpos de prova, momento em que o rejuvenescedor foi aplicado utilizando-se um pincel e uma taxa de 1kg para cada 4m<sup>2</sup> (Mah, 2006), o que equivale a 6,7 gramas para a superfície aproximada de 270 cm<sup>2</sup> de cada corpo de prova compactado. O procedimento é ilustrado na Figura 3.31.



Figura 3.31- Corpos de prova com “RejuvaSeal”: (a) processo de revestimento; (b) Em repouso

Após o revestimento aplicado, as amostras foram deixadas por mais 24 horas em repouso numa sala com temperatura controlada (25°C) antes de serem submetidas a qualquer teste ou ataque químico.

### 3.2.10.3 - IMERSÃO EM AGENTES AGRESSIVOS

Antes da imersão das amostras, foi verificado se o RejuvaSeal solubilizava em água ou gasolina, pois se assim o fosse, provavelmente o material seria facilmente desprendido das faces das amostras, facilitando a penetração destes agentes agressivos no interior do corpo de prova, desencadeando a redução das características mecânicas com maior facilidade. Entretanto, testes rápidos foram realizados em laboratório, onde cerca de 10 gramas de RejuvaSeal foram colocadas dentro de recipiente contendo 1000ml de água quente (60°C) ou gasolina (25°C). Nenhuma dispersão foi observada num intervalo de 24 horas, ou seja, o RejuvaSeal não se solubilizava com os agentes agressores.

Conforme preconizado na norma europeia EN 12697-43, os corpos de prova foram imersos em agentes agressores por período de 24 horas ( $\pm 30$ min) à temperatura ambiente, entre 18° a 25°C. Sendo assim, 8 corpos de prova foram testados em condição natural e o restante foi imerso em água quente (60°C), em gasolina (25°C) ou em uma combinação – sendo imersos em água e, 24 horas após, em gasolina. A quantidade de corpos de prova testados nos procedimentos é apresentada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Quantidade de corpos de prova ensaiados

<i>Condições dos Ensaios</i>	<i>Natural</i>	<i>Imersão em água (60°C)</i>	<i>Imersão em gasolina (25°C)</i>	<i>Imersão em Água (60°C) e após Gasolina (25°C)</i>
Sem "RejuvaSeal"	4	4	4	4
Com "RejuvaSeal"	4	4	4	4
Total	8	8	8	8

Seguindo recomendação de CCEL (2006), o tempo de imersão dos corpos de prova foi de 4 horas. Após esse período, as amostras colocadas na água foram retiradas e colocadas em repouso durante 24 horas para que fosse atingida a temperatura ambiente. Assim, os corpos de prova conservaram sua forma original, já que o aquecimento poderia deformá-los antes que pudessem ser realizados ensaios mecânicos. Paralelamente, as amostras imersas em gasolina

foram retiradas e colocadas para escorrer durante igual período de tempo, para posterior avaliação mecânica.

#### 3.2.10.4 - AVALIAÇÃO VISUAL E MECÂNICA

Para avaliar a resposta dos corpos de prova frente aos agentes agressivos apresentados no item anterior, foi quantificada a perda de massa média após a imersão, baseado na classificação apresentada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Classificação da resistência a agentes agressores (EN 12697-43)

<i>Classificação</i>	<i>Perda de massa após imersão em agentes agressores – A (1ª fase)</i>	<i>Perda de massa após escovação – B (2ª fase)</i>
<i>Boa resistência</i>	A ≤ 5,0%	B < 1,0%
<i>Resistência moderada</i>	A ≤ 5,0%	1,0% ≤ B < 5,0%
<i>Resistência fraca</i>	A > 5,0%	B > 5,0%

É importante ressaltar que a norma européia preconiza não só a avaliação após imersão em agentes agressores (A), mas também após escovação com uma escova metálica (B). Nesta pesquisa foi realizada somente a fase A, onde as amostras tiveram determinadas as porcentagens de perda de massa e realização de ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência.

A quantidade de ensaios realizados mecânicos sobre as amostras compactadas foi 32, número possível devido ao fato de o ensaio de Módulo de Resiliência ser um teste não destrutivo, podendo os corpos de prova, assim, serem reutilizados em outros testes.

Os ensaios foram realizados em laboratório com temperatura controlada a fim de garantir iguais condições ambientais para todos os corpos de prova. Essa temperatura foi fixada em 25°C, conforme preconizam as normas dos respectivos ensaios mecânicos.

Um total de 16 ensaios de Resistência à Tração por compressão diametral foi realizado sobre os corpos de prova, sendo o padrão de ruptura dos mesmos uma trinca diametral. Quatro corpos de prova foram testados: dois sem cobertura de RejuvaSeal e dois com cobertura – estes últimos não submetidos às agressões descritas e, portanto, determinados como amostras de referência para efeito de comparação.

No ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral em misturas asfálticas, a aplicação das forças se dá por meio de frisos metálicos de 12,7 mm de largura com curvatura adequada ao corpo de prova. A influência dos frisos não é considerada pela norma DNER-ME 138/94. Seguindo a metodologia de avaliação, os corpos de prova foram solicitados diametralmente por cargas concentradas de compressão, gerando uma tensão de tração uniforme perpendicularmente ao diâmetro solicitado.

Assim como no ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral, foi realizado um total de 16 ensaios de Módulo de Resiliência sobre os corpos de prova. Quatro deles foram tomados como referência: dois sem cobertura de RejuvaSeal e dois com cobertura – todos sem exposição aos agentes agressores.

Os corpos de prova foram ensaiados conforme especificado pela norma DNER-ME 133/94, em que foi repetidamente aplicada uma carga no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico. A frequência de carregamento utilizada foi de 1s para cada ciclo – 0,1s correspondendo à aplicação de carga e 0,9s ao descanso.

# CAPÍTULO 4

## ***Apresentação e Análise de Resultados***

---

### **4.1 - INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta as análises e discussões dos resultados experimentais obtidos por meio de ensaios de laboratório descritos no capítulo anterior. Inicialmente é apresentada a caracterização tradicional, depois as prescritas pela especificação Superpave e as análises químicas do ligante extraído do material fresado, além do ligante virgem e demais modificados pela adição de rejuvenescedores para teores de 15%, 20% e 25%. Em seguida serão apresentados resultados de simulação em laboratório do envelhecimento que ocorre durante o processo de usinagem, transporte, espalhamento e compactação da mistura asfáltica.

Posteriormente são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios mecânicos e ambientais com as misturas asfálticas contendo 100% de material fresado com adição de rejuvenescedores, indicando qual material e teor ótimo são recomendados para utilização em campo. Por fim, os resultados de avaliação do efeito selante de rejuvenescedor a base de alcatrão.

Foram utilizados testes de hipóteses, onde a distribuição “t” de “*Student*” e análise de variância (ANOVA) fundamentaram as conclusões dos dados por meio de um tratamento estatístico.

## 4.2 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Serão apresentados resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos do agregado, material fresado, rejuvenescedores, ligante novo e rejuvenescidos.

### 4.2.1 - AGREGADOS E MATERIAL FRESADO

Foram realizadas três determinações do teor de ligante no material fresado nas quais o valor médio obtido foi de 5,0%. Este teor foi adotado como o teor de ligante representativo da mistura fresada em questão, adotando a nomenclatura de CAP-20, pois na época em que a mistura asfáltica foi realizada, este foi o ligante utilizado.

Porções de fresado após extração do ligante de agregado natural foram avaliadas, no intuito de determinar a densidade real para a fração graúda e miúda, abrasão Los Angeles, adesividade e índice de forma. Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de laboratório e o valor referência correspondente às normas pertinentes.

Tabela 4.1 - Caracterização de agregados naturais e do material fresado

<i>Ensaio</i>	<i>Norma Ensaio DNER-ME</i>	<i>Valor referência (DNIT ES- 031/2006)</i>	<i>Resultados</i>	
			<i>Agregado Natural</i>	<i>Fresado</i>
Abrasão Los Angeles	035/98	(Faixa B) < 50%	18%	20%
Absorção	081/98	N.A.	0,36%	0,27%
Adesividade	079/94	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
Densidade agregado graúdo	081/98	N.A.	2,70 g/cm <sup>3</sup>	2,68 g/cm <sup>3</sup>
Índice de Forma	086/94	> 0,5	0,66	0,6
Densidade agregado miúdo	194/98	N.A.	2,67 g/cm <sup>3</sup>	2,57 g/cm <sup>3</sup>

Tanto o agregado natural novo, quanto o agregado recuperado do material fresado são oriundos da britagem de rochas carbonáticas (geralmente calcários e dolomitos), abundantes na região do Distrito Federal. Em geral os valores das propriedades obtidas na Tabela 4.1 estão muito próximos e dentro da faixa de variação dos ensaios, embora os agregados aqui comparados sejam provavelmente provenientes de jazidas diferentes uma vez que foram extraídos em épocas diferentes. Entretanto, observa-se que os resultados de densidade para os

agregados obtidos pelo material fresado apresentaram valores inferiores aos dos agregados naturais. Possivelmente, mesmo após extração, o agregado de material fresado ainda possuía ligante em seus vazios, o que reduz sua capacidade de absorção, também observada por meio de ensaio de laboratório. Apesar dos valores inferiores aos observados para um agregado natural, o material fresado atende aos valores de referência, sendo estes então aplicáveis aos estudos que se seguem.

Outro fator importante que se notar é a granulometria do material fresado antes e após extração do ligante residual, ilustrada na Figura 4.1.

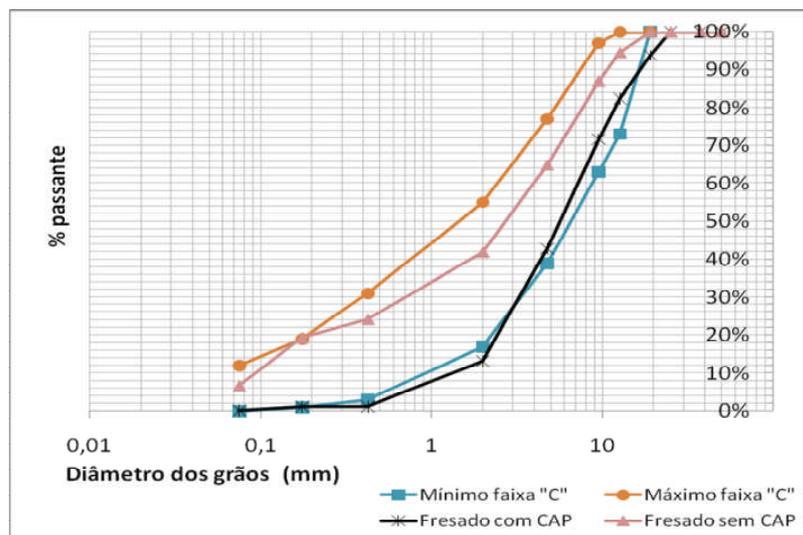


Figura 4.1 - Curva granulométrica do material fresado antes e após extração do ligante

Os valores obtidos para fresado com ligante residual fazem com que sua granulometria seja enquadrada no limite inferior estabelecido para a camada de rolamento da faixa “C” (DNIT, 2004). Após extração do ligante, entretanto, verifica-se que o material enquadra-se dentro da faixa de projeto, o que favorece sua utilização em projetos de reciclagem sem que haja necessidade de correção da granulometria da mistura, conforme proposto nesta pesquisa.

#### 4.2.2 - REJUVENESCEDORES

Conforme especificado pela FAA (2006) e DNC (1997), foram realizados ensaios de caracterização para os rejuvenescedores à base de alcatrão (“RejuvaSeal”) e óleo de xisto (ARs) a fim de verificar se os mesmos atendiam aos valores de referência. Estes ensaios

foram realizados no LER-UnB e pelo Laboratório de Asfaltos da empresa Betunel, que forneceu os materiais à base de óleo de xisto. Os resultados são apresentados na Tabela 4.2 e na A avaliação do ponto de amolecimento do rejuvenescedor à base de alcatrão foi realizada com resíduo obtido após o aquecimento a 300°C em estufa convencional, pois o material em estado natural apresenta-se muito fluido, o que impossibilita realização de tal ensaio.

Tabela 4.3.

Tabela 4.2 - Caracterização do rejuvenescedor à base de alcatrão

<b>Ensaio</b>	<b>Valor Referência</b>	<b>Valor Obtido</b>
Densidade a 25°C	Mín. 1,04 g/cm <sup>3</sup>	1,14
Amolecimento do resíduo após aquecimento a 300°C	Máx. 65°C	54°C

A avaliação do ponto de amolecimento do rejuvenescedor à base de alcatrão foi realizada com resíduo obtido após o aquecimento a 300°C em estufa convencional, pois o material em estado natural apresenta-se muito fluido, o que impossibilita realização de tal ensaio.

Tabela 4.3 - Caracterização dos Agentes Rejuvenescedores à base de óleo de xisto.

<b>Propriedades</b>	<b>Norma de ensaio</b>	<b>AR-5</b>	<b>AR-250</b>	<b>AR-500</b>
Viscosidade Cinemática a 60°C (cSt)*	NBR - 14756	589	35757	57200
Ponto de Fulgor (°C)	NBR - 11341	267	290	285
Ponto de Combustão (°C)	NBR - 11341	298	313	321
Teor de Saturados (%), peso*	ASTM - D 2007	26,0	22,0	18,0
Densidade - 20/4°C (g/cm <sup>3</sup> )	NBR - 6296	0,921	1,001	1,02
Viscosidade a 135°C (20rpm)	NBR - 15184	25	138	630
Brookfield (SP 21), cP a 150°C (20 rpm)	NBR - 15184	15	73	320
a 177°C (20 rpm)	NBR - 15184	0	35	102

<b>Efeito do calor e do ar – Envelhecimento em curto prazo (RTFOT)</b>					
Varição de massa (%), peso	Máximo 4,0	ASTM - D 2872	3,70	2,50	1,30
Razão de Viscosidade (%), peso	Máximo 4,0	N.A.	3,30	2,10	1,90
Viscosidade Brookfield (SP 21), cP a 135°C (20rpm)	(Não especificado)	NBR - 15184	55	170	290
a 150°C (20 rpm)	(Não especificado)	NBR - 15184	28	95	165

a 177°C (20 rpm)	(Não especificado)	NBR - 15184	12	48	75
------------------	--------------------	-------------	----	----	----

\*Ensaio realizado pelo Fabricante (Betunel).

Observa-se que os rejuvenescedores utilizados na pesquisa atendem aos respectivos valores de referência já apresentados na Tabela 2.2, o que fundamenta seu uso nas aplicações que se seguem durante a fase experimental desta pesquisa.

#### 4.2.3 - CARACTERIZAÇÃO TRADICIONAL DOS LIGANTES

A caracterização do CAP “virgem” (CAP 50/70) foi realizada com o objetivo de verificar se o material encontrava-se dentro das especificações da Resolução n°. 19 da ANP e da norma DNIT 095/2006.

Após a extração do ligante do material fresado, o CAP envelhecido naturalmente foi também caracterizado com a mesma bateria de ensaios do CAP “virgem” ocorrendo o mesmo com as misturas de CAP rejuvenescido. Os teores de mistura foram definidos em porcentagem em massa do CAP envelhecido, utilizando os agentes rejuvenescedores AR5, AR250, AR500 e RejuvaSeal, nas porcentagens de 15%, 20% e 25% em relação ao peso de ligante de uma mistura de CBUQ convencional com 5% de ligante, conforme descrito no capítulo anterior.

Posteriormente, todos os materiais como CAP “virgem” (CAP 50/70), CAP envelhecido naturalmente (CAP20), e os CAP’s rejuvenescidos com os teores já mencionados, foram levados à estufa RTFOT nas condições especificadas nas normas, em seguida, foram novamente caracterizados para determinação da variação nas propriedades do material.

O resumo de todos os resultados encontrados nos experimentos realizados no LER-UnB está apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Caracterização dos Ligantes Utilizados na Pesquisa

Ensaio	Unidades	Valor de Referência para o CAP 50/70	CAP 50/70	CAP 20	REJ. 15%	REJ. 20%	REJ. 25%	AR500 15%	AR500 20%	AR500 25%	AR250 15%	AR250 20%	AR250 25%	AR5 15%	AR5 20%	AR5 25%
Penetração (100g,5s,25°C)	0,1mm	50 - 70	53.0	40.0	130.3	169.7	171.5	39.8	43.5	44.3	44.3	46.0	49.8	65,6	68,3	88,5
Ponto de amolecimento	°C	46.0	46.5	51.0	41.8	37.3	30.0	49.3	50.0	49.8	49.0	47.5	47.8	47,7	47,2	46,1
<b>Viscosidade Brookfield para Ligantes</b>																
a 135 °C, sc 21 (20rpm)	cP	274	385	545	273	240	168	535	500	490	478	455	428	335	285	250
a 150 °C, sc 21 (50 rpm)	cP	112	165	256	325	310	305	280	265	263	258	243	233	183	155	135
a 177 °C, sc 21 (100rpm)	cP	57 - 285	60	99	143	135	135	123	115	80	113	110	105	85	75	65
G*/senδ (46°C)	kPa	> 1	22,0	51,2	11,8	7,5	4,0	42,3	40,3	43,7	32,6	32,0	32,8	15,4	11,96	8,2
Índice de susceptibilidade térmica	-	(-1,5) a (+0,7)	-2.0	-1.4	-1.0	-2.0	-6.1	-1.9	-1.5	-1.5	-1.7	-2.0	-1.8	-1,15	-1,19	-0,8
Ponto de combustão	°C	N.A.	385	412	220	208	180	336	340	338	342	342	340	340	334	322
Ponto de fulgor	°C	>235	325	369	200	194	136	308	318	310	322	328	320	304	306	298
Densidade CAP	-	N.A	1.07	1.06	1.04	1.05	1.05	1.01	1.02	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
Ductilidade a 25° C	cm	60	100	100	45	43	35	100	100	100	100	100	100	100	88.2	100
<b>Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min</b>																
Varição em massa	% massa	≤ 0,5	0.16%	0.09%	4.22%	5.19%	7.01%	0.17%	0.54%	0.45%	0.46%	0.42%	0.53%	0.23%	0.24%	0.27%
Aumento do ponto de amolecimento	°C	≤ 8	1.5	2.3	15.5	19.0	26.8	4.8	3.3	3.0	4.0	5.0	2.5	2.0	2.8	0.9
Penetração retida	%	≥ 55	73%	93%	14%	10%	10%	54%	49%	49%	45%	46%	49%	78%	83%	69%
G*/senδ (46°C)	kPa	> 2	33,0	92,2	217,2	262,0	269,4	133,4	136,0	134,6	109,0	114,8	111,6	53,3	49,3	47,2

Além destes resultados, também foi obtida viscosidade Saybolt-furol para verificar se o ligante residual enquadrava-se na especificação vigente à época de sua utilização, ou seja, de um CAP 20, conforme Regulamento Técnico DNC N° 01/92 apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Especificação técnica para o CAP 20 (DNC, 1992).

<i>Ensaio</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valor referência</i>		
		CAP - 20	ABNT	ASTM
<b>Viscosidade Saybolt Furol</b>				E 102
- a 135°C	sSF	120 mín.	MB - 517	D 2170 e
- a 177°C	sSF	30 a 150		D 2161
<b>Efeito do calor e do ar (ECA) a 163 °C por 5 h</b>				
- Variação em massa	%	1,0 máx.	MB - 425	D 1757
- Ductilidade a 25° C	cm	20 mín.	MB - 167	D 113
<b>Índice de suscetibilidade térmica</b>		(-1,5) a (+1)	-3	
<b>Penetração (100 g, 5 s, 25°C)</b>	0,1 mm	50 mín.	MB - 107	D 5
<b>Ponto fulgor</b>	°C	235 mín.	MB - 50	D 92
<b>Solubilidade em tricloroetileno</b>	% massa	99,5 mín.	MB - 166	D 2042

Os resultados obtidos para viscosidade Saybolt-furol são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados obtidos para viscosidade Saybolt-furol.

<i>Material</i>	<i>Temperatura e valores de referência</i>		
	<i>a 135 °C</i>	<i>a 150 °C</i>	<i>a 177 °C</i>
	<i>mín. 120 sSF</i>	<i>N.A.</i>	<i>30 a 150 sSF</i>
<b>CAP 20</b>	280	164	78
<b>CAP20+REJ. 15%</b>	132	76	34
<b>CAP20+REJ. 20%</b>	107	65	14
<b>CAP20+REJ. 25%</b>	113	61	26
<b>CAP20+AR500 15%</b>	275	135	46
<b>CAP20+AR500 20%</b>	249	118	43
<b>CAP20+AR500 25%</b>	221	109	44
<b>CAP20+AR250 15%</b>	246	125	43
<b>CAP20+AR250 20%</b>	207	108	39
<b>CAP20+AR250 25%</b>	219	108	40
<b>CAP20+AR5 15%</b>	150	87	34
<b>CAP20+AR5 20%</b>	133	74	28
<b>CAP20+AR5 25%</b>	125	66	26

É possível observar que os valores obtidos para o CAP 20 extraído do material fresado, atende às especificações de um ligante novo com as mesmas características. Entretanto, quando foram adicionados certos rejuvenescedores, a viscosidade Saybolt não se enquadrou nas especificações de um CAP 20, mas atende às características de viscosidade Brookfield de um CAP 50/70, conforme resultados mostrados na Tabela 4.4.

Na avaliação do CAP 50-70 observa-se que, após envelhecimento em estufa RTFOT, ocorreu aumento de consistência proporcionado pela oxidação e perda de voláteis devido à exposição de oxigênio e altas temperaturas. Isso conferiu maior consistência e temperatura de amolecimento ao ligante asfáltico.

Brock (1996) comenta que as mudanças nas características de consistência ocorrem devido à exposição à temperatura e oxigênio. Essas mudanças, juntamente com os fatores que governam a velocidade de reação e seus eventuais efeitos, são de fundamental importância para a qualidade do ligante asfáltico e para o sucesso da produção de uma mistura asfáltica.

Por meio do ensaio de envelhecimento RTFOT verifica-se uma sensível variação de massa provocada pela perda de voláteis o qual se manteve dentro dos padrões estabelecido pela norma brasileira, nota-se também uma porcentagem de penetração retida que se deve à diminuição da penetração.

Observa-se pela Tabela 4.4 que todos os ligantes atendem as especificações da norma quanto à ductilidade com exceção do CAP20 ao ser incorporado RejuvaSeal, isso se deve a grande quantidade de fração leve existente na mistura o que pode ser verificado na quantidade de perda de massa deste material e a dificuldade na realização do ensaio deste material se deu devido ao seu baixo ponto de amolecimento.

A seguir, os resultados obtidos e apresentados na Tabela 4.4 são apresentados por meio de gráficos onde será possível avaliar cada característica separadamente para melhor compreensão da mudança dos parâmetros físicos do material estudado.

#### 4.2.3.1 - ENSAIO DE PENETRAÇÃO

A Figura 4.2 mostra a comparação entre os ensaios de penetração de todos os materiais estudados nesta pesquisa, além de mostrar o comportamento destes materiais após os mesmos serem levados à estufa RTFOT.

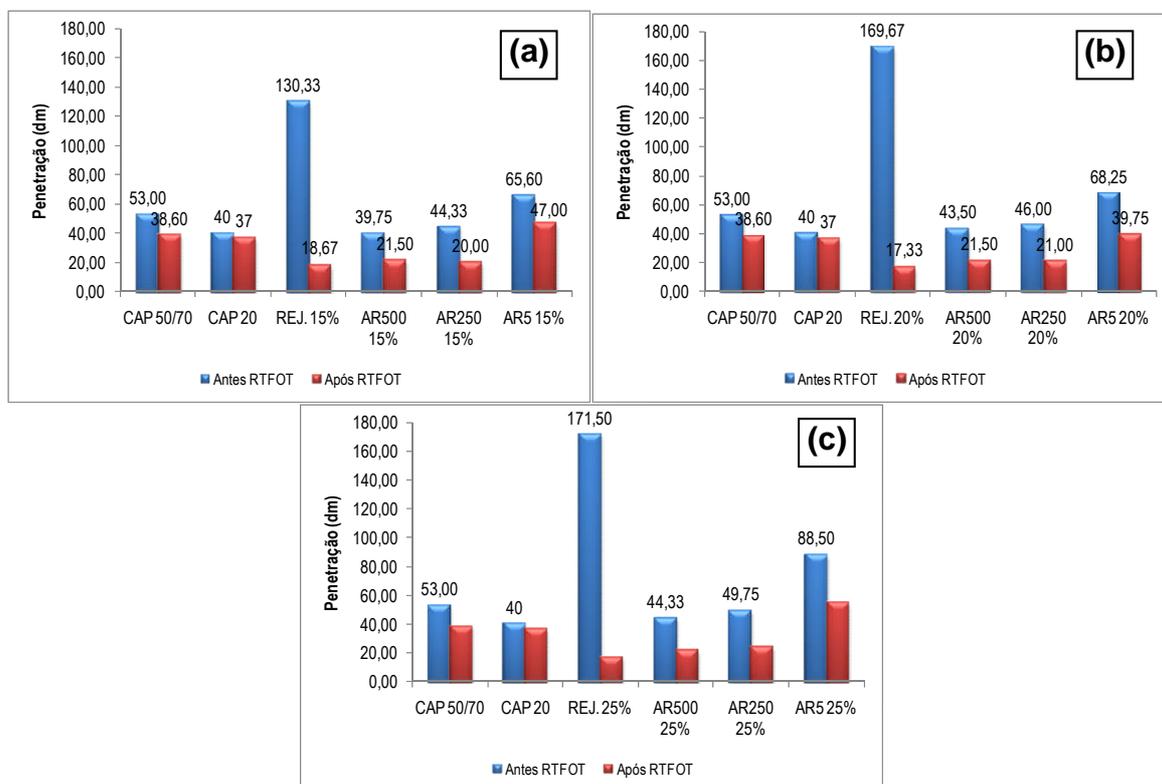


Figura 4.2 - Valores de Penetração antes e depois do RTFOT nos teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25%

Verifica-se que o CAP20 oriundo da extração do fresado, ou seja, CAP envelhecido naturalmente em campo teve uma pequena variação em seu valor da penetração, comparando o ensaio antes e depois do RTFOT, o que caracteriza que o material realmente já estava envelhecido.

É possível observar que a adição dos rejuvenescedores favoreceu a diminuição da consistência da mistura, conferindo maiores valores de penetração. O RejuvaSeal proporcionou à mistura uma penetração muito elevada nos três teores aplicados que inviabiliza o uso do material nestas porcentagens.

Ao fazer a comparação entre o ensaio antes e depois do RTFOT, nota-se uma grande variação do valor da penetração, ficando o valor de penetração no material com adição de RejuvaSeal abaixo do valor do CAP envelhecido (CAP20) após o RTFOT. Todos os rejuvenescedores utilizados pela pesquisa proporcionaram aumento na penetração, mas quando submetido ao envelhecimento em curto prazo a penetração diminuiu consideravelmente com exceção da mistura utilizando AR5 principalmente no teor de 20% após o RTFOT, indicando que para esta característica este é o material que melhor se aproxima do valor da penetração do CAP “virgem” (CAP 50/70), o mais utilizado em revestimentos asfálticos do tipo CBUQ na região do Distrito Federal.

#### 4.2.3.2 - PONTO DE AMOLECIMENTO

Para análise do ponto de amolecimento foram realizados os ensaios de anel e bola nos ligantes tanto antes como depois do envelhecimento em curto prazo, conforme mostra a Figura 4.3.

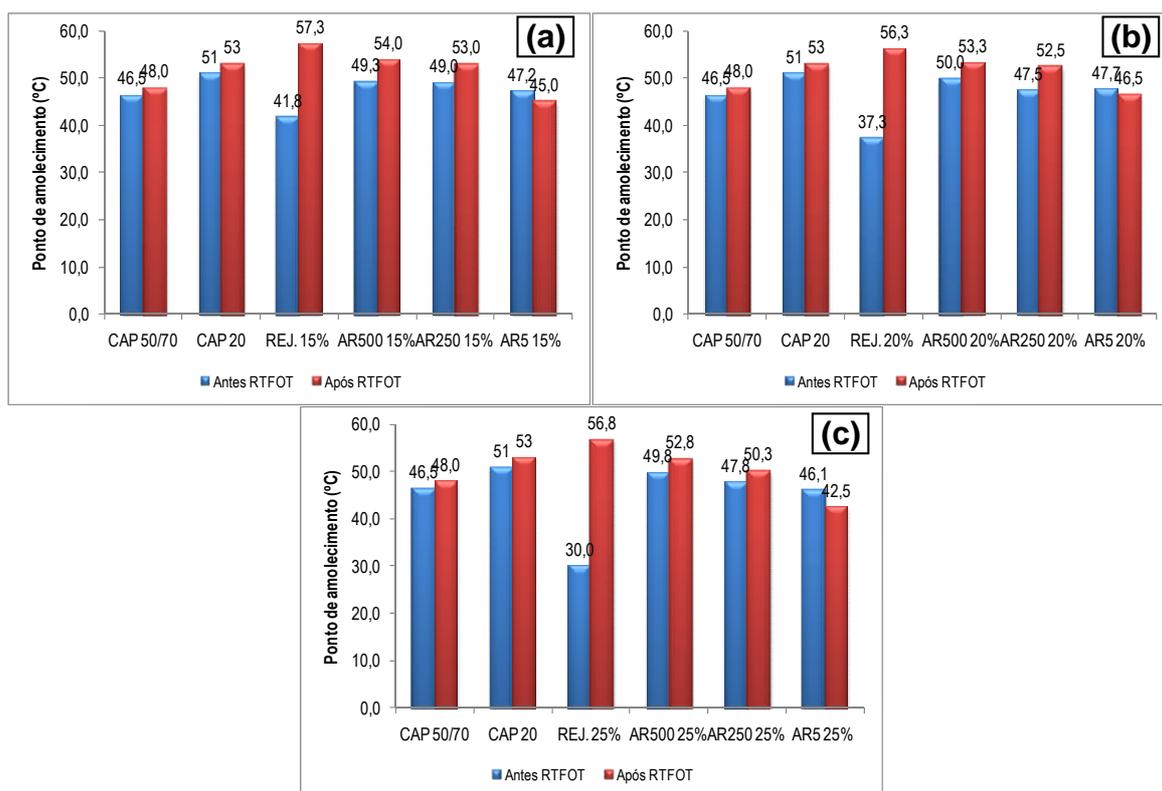


Figura 4.3 - Ponto de Amolecimento antes e depois do RTFOT nos teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25%

Observa-se que ao misturar os rejuvenescedores ao CAP20, todas as misturas tiveram seu ponto de amolecimento diminuído em relação a este CAP envelhecido naturalmente. Novamente este fato é devido à viscosidade dos rejuvenescedores serem menores que o ligante envelhecido, que após ser misturado com aditivos, acaba por ter sua consistência modificada, favorecendo o aumento da temperatura a qual faz com que o material amoleça.

Observa-se também que novamente o RejuvaSeal apresentou o valor mais discrepante, proporcionando a maior diminuição principalmente no teor de adição de 25%, além de uma maior variação depois do envelhecimento RTFOT. O incremento de 20% de AR-5 apresentou valor bem parecido com o CAP 50/70. O AR-500 e AR-250 tiveram um melhor comportamento, pois os seus valores de ponto de amolecimento ficaram acima do ponto de amolecimento do CAP 50/70 para todos os teores de mistura.

#### 4.2.3.3 - PONTO DE FULGOR E COMBUSTÃO

Ponto de fulgor e combustão mede a qual temperatura as substâncias tornam-se perigosas ao manuseio no que diz respeito a sua capacidade de se inflamar, a Figura 4.4 abaixo mostra as temperaturas de ponto de fulgor e combustão dos ligantes utilizados na pesquisa.

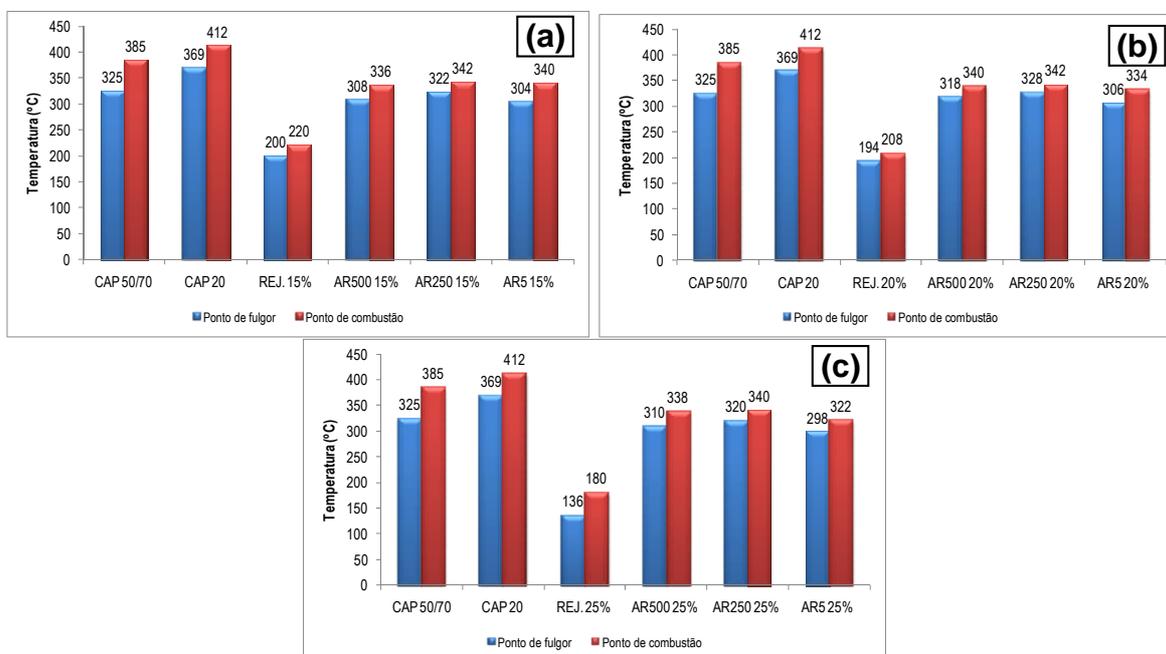


Figura 4.4 - Ponto de Fulgor e Combustão para os teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25%

Dentre as misturas rejuvenescidas, a que apresenta maior risco de se inflamar é a que contém RejuvaSeal, principalmente na taxa de 25%, pois como é possível observar, a temperatura de ponto de fulgor deste ligante é facilmente atingida quando da mistura asfáltica na usina, as demais misturas possuem um ponto de fulgor mais elevado o que dá uma maior segurança no processo de fabricação e manuseio de misturas asfálticas com estes agentes. Assim, novamente o RejuvaSeal apresentou-se inadequado para utilização em misturas à quente como as indicadas nesta pesquisa.

As demais configurações, utilizando AR-5, AR-250 ou AR-500 para qualquer porcentagem de mistura, apresentaram valores superiores aos indicados para um CAP do tipo 50/70, sendo, portanto, recomendados para utilização em campo.

#### 4.2.3.4 - ENSAIO DE DENSIDADE

O ensaio de densidade foi realizado em todos os ligantes desta pesquisa com a finalidade de verificar o comportamento do material após a incorporação dos agentes rejuvenescedores e também obter parâmetros de transformação de unidades gravimétricas em volumétricas, a Figura 4.5 mostra as densidades para os diversos teores de adição.

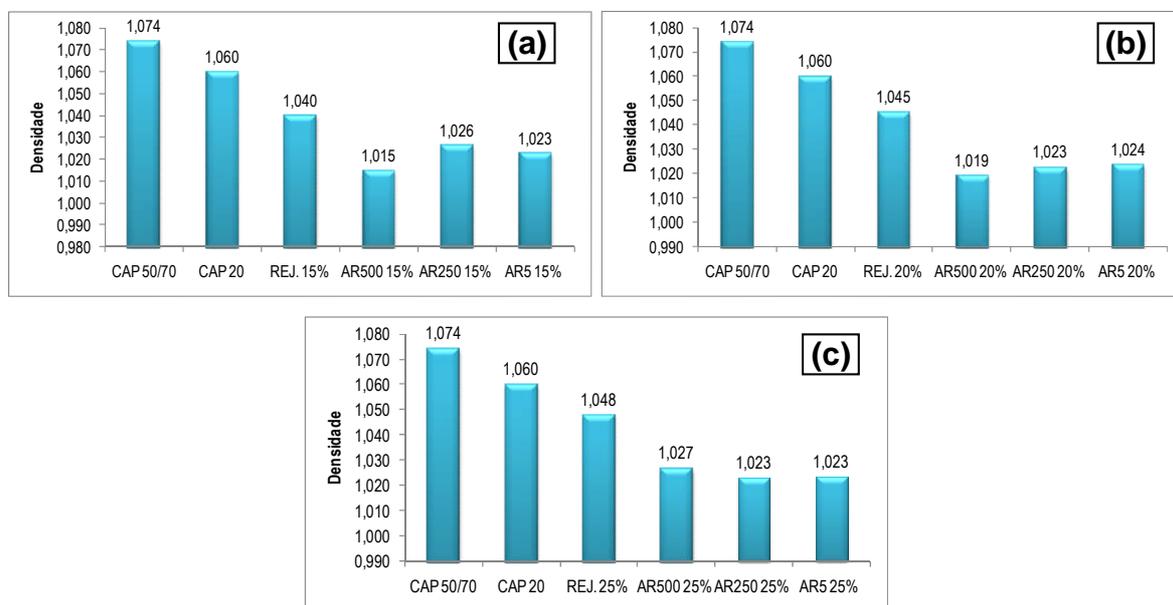


Figura 4.5 - Densidade das misturas nos teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25%

Por meio da Figura 4.5 é possível observar que após a mistura de agente rejuvenescedor ao CAP20 não se verificou mudança significativa no valor da densidade do material, apesar de os rejuvenescedores isoladamente apresentarem valores de densidade inferiores. Assim, nota-se que este fato se deu principalmente devido aos teores ARs ou RejuvaSeal não serem suficientemente expressivos ao ponto de alterar esta característica do ligante.

#### 4.2.4 - CARACTERIZAÇÃO SUPERPAVE

##### 4.2.4.1 - ENSAIO DE PERDA DE MASSA – RTFOT

Após a realização do ensaio de RTFOT foi possível verificar a perda de massa como mostra a Figura 4.6 e a penetração retida conforme Figura 4.7.

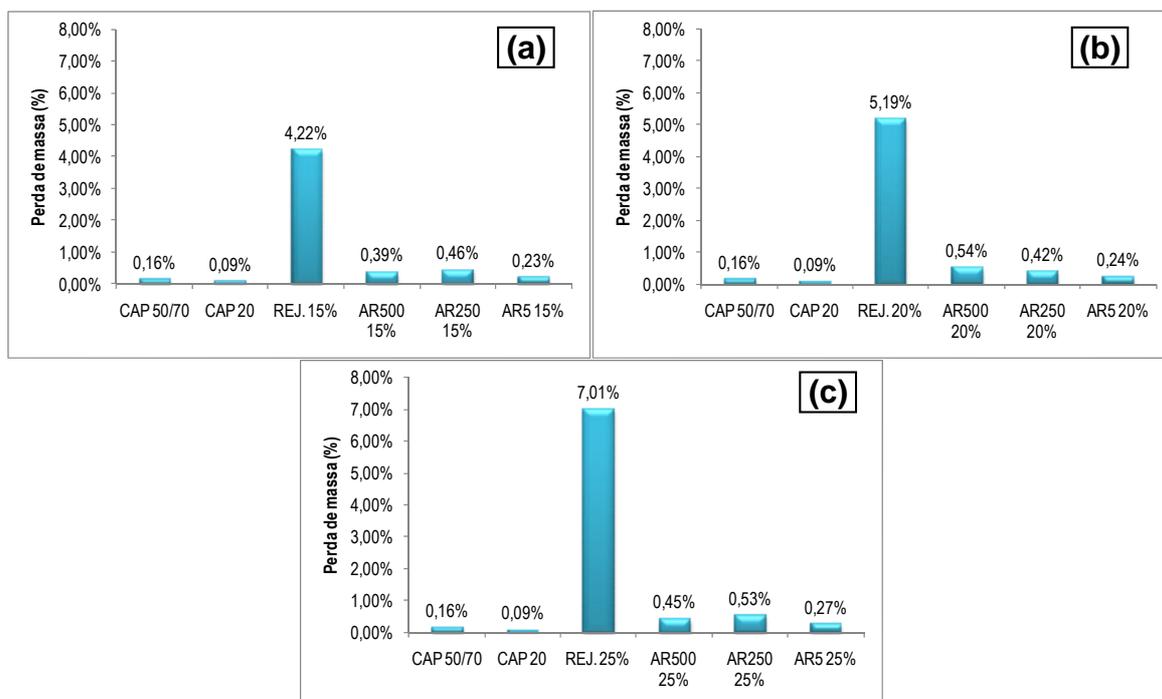


Figura 4.6 - Perda de Massa para os teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25%

Analisando-se a Figura 4.6 verifica-se que o CAP20 teve perda de massa pouco significativa devido ao fato de o mesmo já ter passado pelo processo de usinagem, aplicação e serviço durante sua vida útil. O CAP 50/70 analisado possui uma perda de massa dentro dos padrões normatizados já que o valor máximo é de 0,5%. Entretanto, o RejuvaSeal nas três porcentagens analisadas teve uma alta perda de massa indicando um alto índice de

volatilidade e uma grande capacidade de perda das frações leves, uma vez que apresentava aspecto oleoso e mais fluido que os demais rejuvenescedores estudados nesta pesquisa.

Com exceção da configuração CAP20+20% AR-500, cuja perda de massa foi de 0,54%, os demais rejuvenescedores tiveram comportamento parecido entre si, tendo a sua variação da perda de massa da ordem de 0,23% a 0,54% o que caracteriza um bom comportamento quando comparados ao limite máximo de 0,5% para um CAP 50/70.

A Penetração retida mede a capacidade que um ligante tem de manter sua característica de penetração após o ensaio de envelhecimento em estufa RTFOT, quanto mais próximo de 100% menor é a alteração do valor de penetração no envelhecimento RTFOT. A Figura 4.7 mostra os resultados obtidos para as configurações estudadas nesta pesquisa.

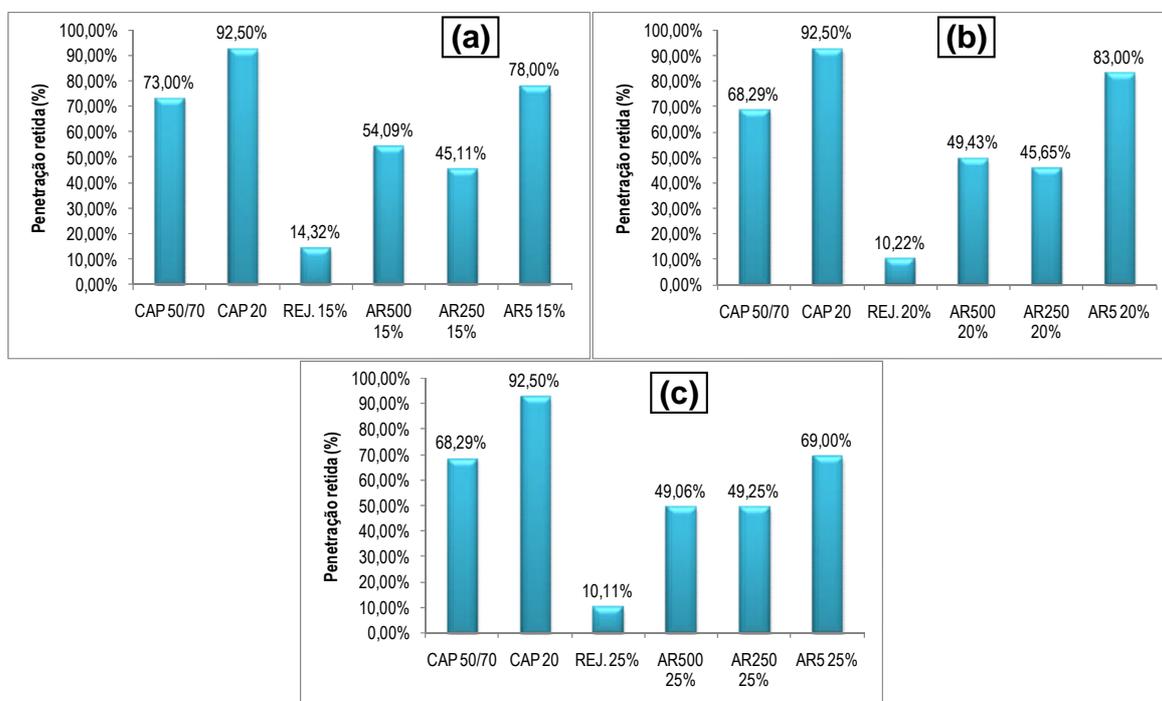


Figura 4.7 - Penetração Retida para os teores de (a) 15%, (b) 20% e (c) 25%

Verifica-se pela Figura 4.7 que o CAP 50/70 teve sua penetração retida dentro do exigido por norma, esta determina que os valores de penetração retida devam ser maiores que 55%. O CAP20 apresentou uma penetração retida bem próximo de 100% o que indica pequena variação na penetração antes e após o RTFOT, isso ocorreu devido a ele já apresentar oxidação e perda de suas frações leves.

A configuração CAP20+RejuvaSeal em todas as porcentagens, apresentou valores muito baixos de penetração retida, indicando que neste material ocorreu grande perda de frações leves, comprovado no ensaio de perda de massa. A mistura CAP20+AR-5 em todas as configurações apresentaram um comportamento muito bom quando comparado ao valor padrão de um CAP 50/70, principalmente para a porcentagem de 20% de adição. Isto se deve ao fato de que o AR-5 é menos viscoso, portanto conferindo também menor viscosidade da mistura e, portanto, uma menor resistência à penetração da agulha durante a realização do ensaio.

#### 4.2.4.2 - VISCOSIDADE APARENTE – BROOKFIELD

Para a determinação do parâmetro de viscosidade foram realizados os ensaios em todos os ligantes utilizados em temperaturas variando de 10 em 10°C iniciando de 135°C como o preconizado em norma. A Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10 mostram o comportamento da viscosidade versus temperatura para teor de 15% de rejuvenescedores misturados ao CAP extraído do material fresado (CAP20).

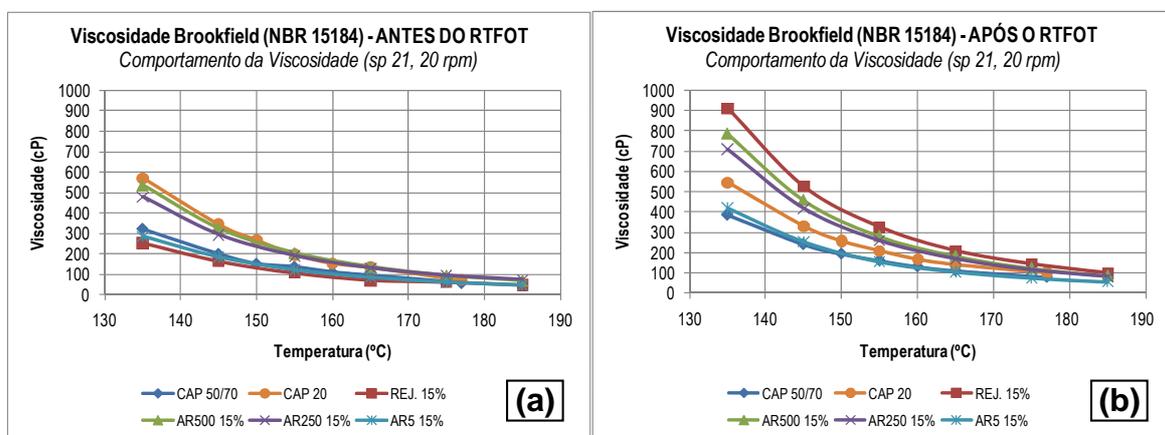


Figura 4.8 - Viscosidade para adição de 15% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT

Verifica-se pela Figura 4.8 que a maior variação de viscosidade ocorreu no material com adição de RejuvaSeal. Antes do RTFOT ele apresentava a menor viscosidade dentre todos os materiais e após o envelhecimento apresentou a maior viscosidade, este aumento de viscosidade se deve a perda de frações leves e oxidação do material quando este é submetido à temperatura mais elevadas provocando o endurecimento do material e conseguinte aumento de sua viscosidade, comprovado pelo ensaio de perda de massa (RTFOT).

É possível verificar também que o CAP20 quase não apresentou variação em sua viscosidade devido ao material já estar envelhecido, o CAP 50/70 também não apresentou grande variação se comparado aos outros materiais com rejuvenescedores incorporados.

Novamente, o material com rejuvenescedor incorporado que obteve o melhor comportamento para esta taxa de aplicação foi o AR 5 que teve sua viscosidade após o envelhecimento RTFOT mais baixa do que a viscosidade do CAP20, entretanto teve sua viscosidade após o envelhecimento maior do que a viscosidade do CAP50/70 indicando uma perda maior das frações leves em relação a este. Os outros dois rejuvenescedores a base de óleo de xisto o AR 250 e o AR 500 tiveram sua viscosidade após o RTFOT maior do que a do CAP20 não sendo materiais adequados nesta taxa de aplicação.

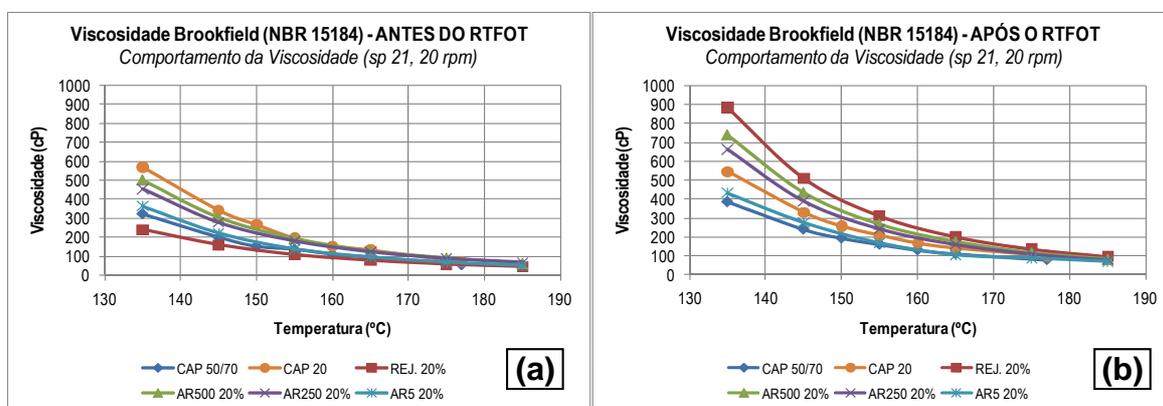


Figura 4.9 - Viscosidade para adição de 20% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT

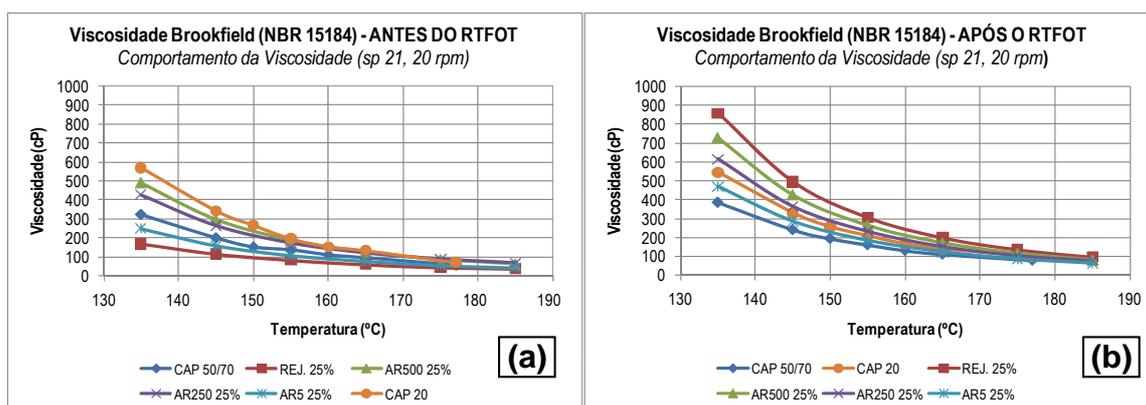


Figura 4.10 - Viscosidade para adição de 25% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT

Para as taxas de mistura de 20 e 25% mostradas na Figura 4.9 e Figura 4.10, respectivamente, verifica-se que o comportamento global dos ligantes analisados após o RTFOT não sofre grandes variações, porém antes do RTFOT a viscosidade vai diminuindo à medida que se

aumenta a taxa de rejuvenescimento, pois este incremento provavelmente faz com que boa parte das frações leves sejam recuperadas e elevadas, fazendo com que o material se torne mais fluido que antes. Verifica-se também que a altas temperaturas as viscosidades tendem a um mesmo valor independente de qual rejuvenescimento é utilizado.

#### 4.2.4.3 - ENSAIO DE CISALHAMENTO DINÂMICO (DSR)

O ensaio de cisalhamento dinâmico foi realizado para todos os ligantes analisados nesta pesquisa, ressaltando o interesse em determinação do parâmetro indicativo da deformação permanente que é governada pelo valor de  $G^*/\text{sen}\delta$ . A Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13 apresentam os resultados de  $G^*/\text{sen}\delta$  obtidos.

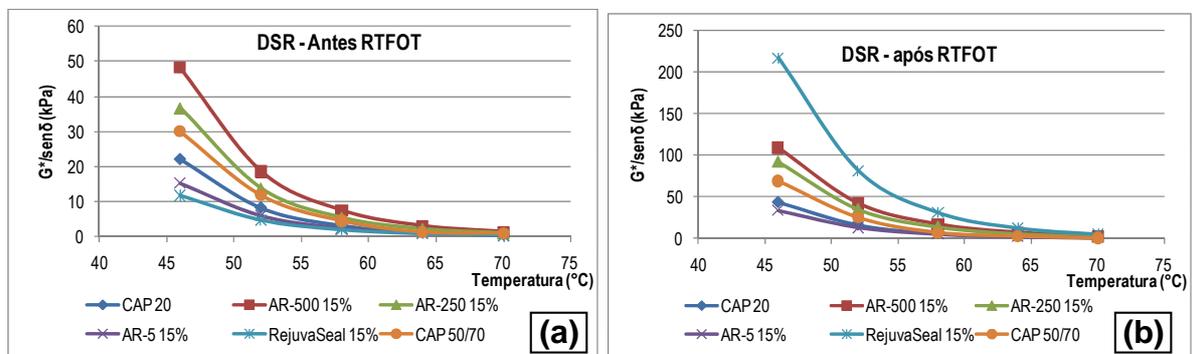


Figura 4.11 –  $G^*/\text{sen}\delta$  dos ligantes nos teores de adição de 15% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT.

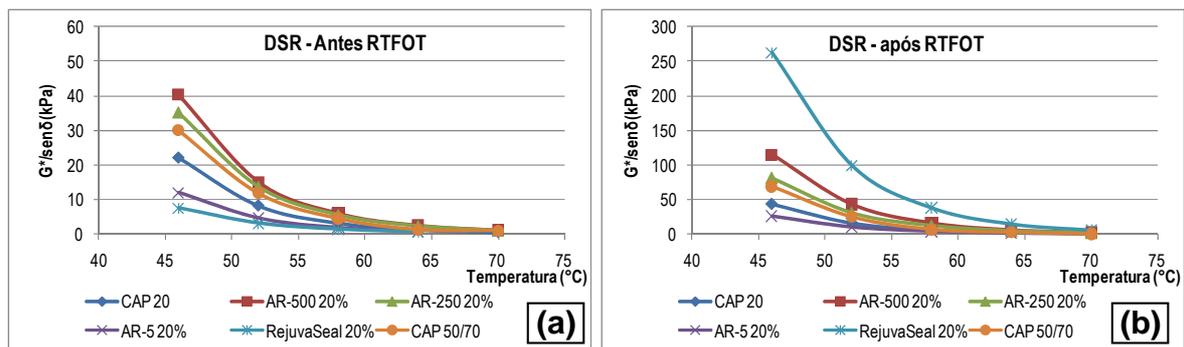


Figura 4.12 –  $G^*/\text{sen}\delta$  dos ligantes nos teores de adição de 20% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT.

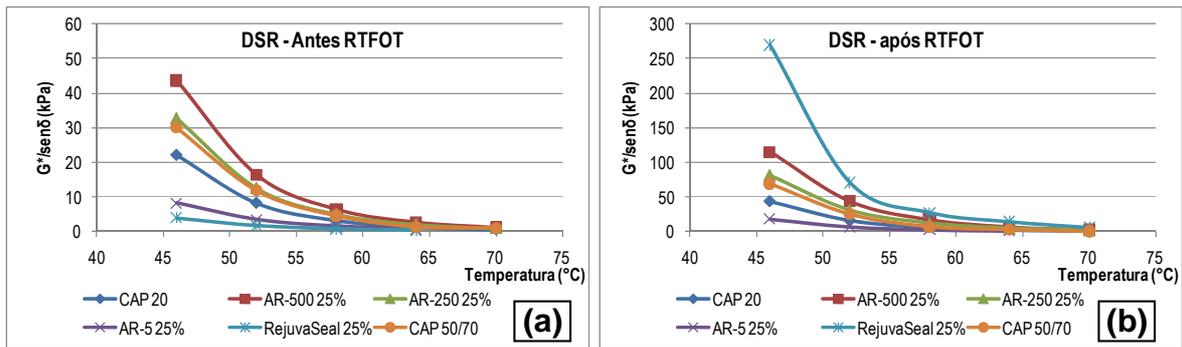


Figura 4.13 -  $G^*/\text{sen}\delta$  dos ligantes nos teores de adição de 25% (a) antes do RTFOT e (b) depois de RTFOT.

Segundo a especificação SUPERPAVE, os valores de  $G^*/\text{sen}\delta$  devem ser maiores que 1,0 kPa para o ligante em estado natural e superior a 2,0 kPa para o ligante que tenha sido submetido ao envelhecimento em curto prazo (RTFOT), sendo as amostras com altos valores de  $G^*$  e baixos valores de  $\delta$  menos sujeitas a problemas de deformações permanentes de caráter viscoso. Os valores mínimos especificados foram alcançados para todos os ligantes avaliados para a temperatura de até 70°C, ou seja, para temperaturas maiores que 70°C, esses ligantes não seriam indicados.

Os resultados também indicam que os ligantes com menor viscosidade apresentaram os maiores valores de rigidez ( $G^*/\text{sen}\delta$ ), ou seja, são mais resistentes ao acúmulo de deformação permanente.

Nota-se que após serem submetidos ao ensaio de RTFOT, os ligantes tiveram seu comportamento reológico alterado, principalmente aqueles ligantes que se apresentavam menos viscosos. Estes por sua vez, perderam frações leves, aumentando sua consistência, tendo um aumento significativo nos valores de  $G^*/\text{sen}\delta$ . O ligante que mais sofreu alteração nesta característica foi o ligante com adição de RejuvaSeal, que em todas as porcentagens passou de uma condição de menor rigidez (antes RTFOT) para a maior rigidez após ser submetido ao envelhecimento em curto prazo.

Também foram avaliados resultados de ângulo de fase ( $\delta$ ), apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados dos ângulos de fase obtidos para os ligantes.

Material	15%		20%		25%	
	Antes RTFOT	Após RTFOT	Antes RTFOT	Após RTFOT	Antes RTFOT	Após RTFOT
CAP 20	84,71	82,0	84,71	82,0	84,71	82,0
RejuvaSeal	83,08	67,27	83,34	65,14	84,2	65,6
AR-5	81,51	76,54	81,85	78,09	83,36	76,83
AR-250	80,2	73,61	80,65	73,75	81,44	73,89
CAP 50/70	79,1	77,3	79,1	77,3	79,1	77,3
AR-500	77,88	71,65	77,62	71,88	77,67	71,7

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.7, foram construídos gráficos, apresentados na Figura 4.14, Figura 4.15 e na Figura 4.16.

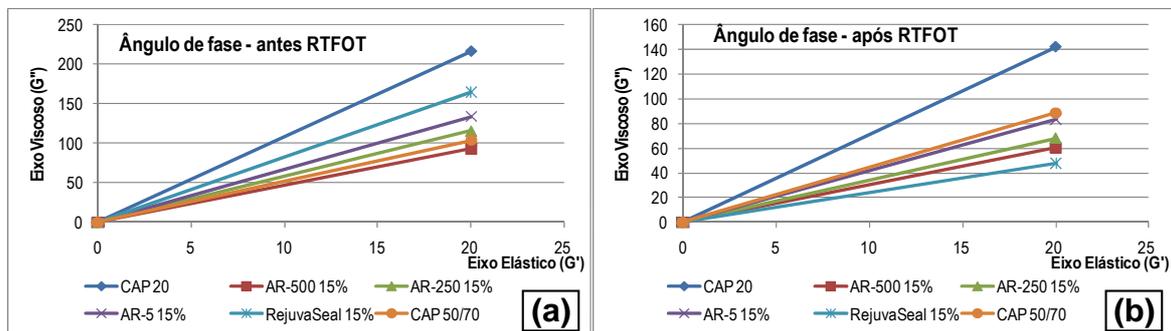


Figura 4.14 – Ângulo de fase para adição de 15% (a) antes do RTFOT e (b) após RTFOT.

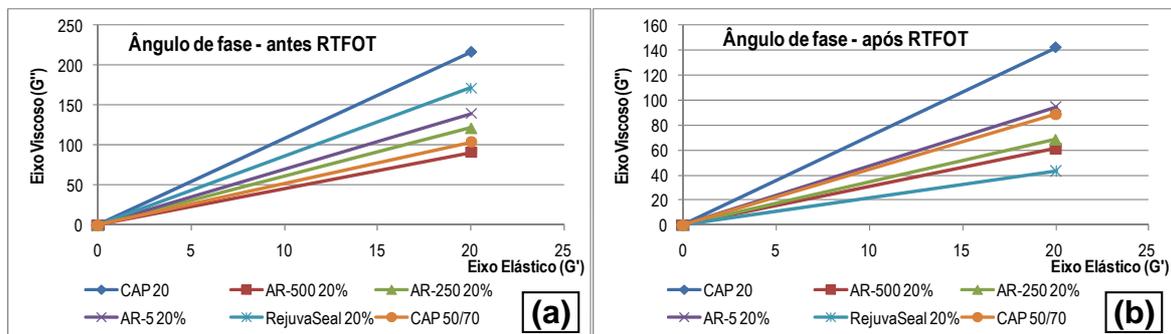


Figura 4.15 – Ângulo de fase para adição de 20% (a) antes do RTFOT e (b) após RTFOT.

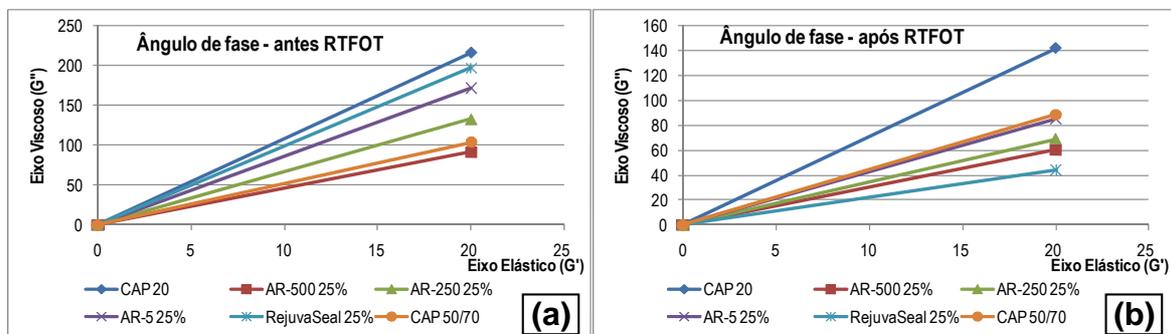


Figura 4.16 – Ângulo de fase para adição de 25% (a) antes do RTFOT e (b) após RTFOT.

Dos resultados aqui apresentados se observa que os valores de ângulo de fase ( $\delta$ ) são inversamente proporcionais à viscosidade dos ligantes avaliados. Isto significa que ligantes mais viscosos apresentam melhor resistência à formação de trincas por fadiga no pavimento.

Após o ensaio de RTFOT houve uma inversão dos valores de ângulo de fase, ou seja, aqueles ligantes cuja viscosidade era mais baixa perderam frações leves, tornando o material mais consistente e, portanto mais viscoso, reduzindo então seu valor de ângulo de fase. Um bom exemplo deste fato é o ligante com adição de RejuvaSeal, que em todas as configurações passou de uma condição cujo ângulo de fase era o menor entre os demais, para a condição com maior valor de  $\delta$ .

#### **4.2.5 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS**

Além da caracterização física e reológica, foram avaliados quais rejuvenescedores e quantidades fizeram com que o ligante extraído (envelhecido) apresentasse compostos químicos em quantidade semelhante à de um CAP 50/70.

##### *4.2.5.1 - CROMATOGRAFIA (SARA)*

A cromatografia sobre coluna de sílica IATROSCAN permitiu separar diretamente os constituintes dos ligantes asfálticos avaliados nesta pesquisa. Foram obtidas as quatro famílias SARA em função da polaridade do ligante, onde a partir do teor de cada fração foi possível verificar qual a quantidade e o rejuvenescedor fez com que o ligante envelhecido se aproximasse de um CAP 50/70 tomado como padrão.

A Tabela 4.8 traz os resultados obtidos para cada configuração estudada. Nela é possível observar os resultados obtidos para cada fração SARA em todas as configurações avaliadas, comparando-as inicialmente com os valores típicos estabelecidos pelo manual da Shell (2003) e também com os valores obtidos para o CAP 50/70.

Tabela 4.8 – Composição química dos ligantes avaliados pelo método SARA.

<i>Ligantes avaliados</i>	<i>Valores típicos estabelecidos pelo Manual da Shell(2003)</i>				<i>Índice de Instabilidade Coloidal (Ic)</i>
	<i>Saturados (5 a 20%)</i>	<i>Aromáticos (40 a 65%)</i>	<i>Resinas %(Gelatina)</i>	<i>Asfaltenos (5 a 25%)</i>	
CAP 50/70	7,9	44	33	16	0,31
CAP 20	8,8	<b>34</b>	36	22	0,44
CAP20 + 15% AR 5	7,5	<b>37</b>	33	22	0,42
<b>CAP20 + 20% AR 5</b>	<b>8,3</b>	<b>40</b>	<b>35</b>	<b>17</b>	<b>0,34</b>
<b>CAP20 + 25% AR 5</b>	<b>7,6</b>	<b>44</b>	<b>32</b>	<b>16</b>	<b>0,31</b>
CAP20 + 15% AR 250	7,5	<b>37</b>	33	22	0,42
CAP20 + 20% AR 250	8,4	<b>39</b>	34	18	0,36
CAP20 + 25% AR 250	7,5	<b>30</b>	42	20	0,38
CAP20 + 15% AR500	6,8	<b>34</b>	35	24	0,45
CAP20 + 20% AR 500	7,2	<b>34</b>	35	24	0,45
CAP20 + 25% AR 500	8,2	<b>29</b>	41	21	0,42
CAP20 + 15% RejuvaSeal	<b>4,7</b>	<b>33</b>	39	23	0,38
CAP20 + 20% RejuvaSeal	6,3	<b>34</b>	35	24	0,44
CAP20 + 25% RejuvaSeal	6,5	<b>36</b>	35	22	0,40

\*Valores em % (porcentagem)

É possível observar que o teor de asfaltenos não apresentou variação fora dos limites estabelecidos pela Shell (2003). Entretanto, os teores de saturados e aromáticos por vezes apresentaram valores incompatíveis com aqueles tomados como padrão.

As composições que se enquadraram nos padrões estabelecidos foram, respectivamente, o CAP+20% de AR5 e CAP+25% de AR5, recompondo principalmente a fração de aromáticos e redução das resinas e asfaltenos, produzindo uma ligante semelhante ao CAP 50/70.

Silva (2005) comenta que estes compostos aromáticos sofrem com a ação da temperatura e exposição ao ar, fazendo com que sejam condensados (reduzidos), produzindo resinas e parte das resinas produz asfaltenos, formando assim uma mistura bastante instável.

De acordo com os critérios de Glita (1988), o Índice de Instabilidade Coloidal (Ic) de todos os ligantes avaliados pode ser enquadrado numa condição intermediária ( $0,1 \leq Ic \leq 0,5$ ), onde quanto maior for Ic, maior será a Instabilidade Coloidal do asfalto e mais difícil a incorporação de um modificador, como por exemplo, um polímero. Entretanto, é possível notar que os ligantes CAP+20% de AR5 e CAP+25% de AR5, cujos compostos aromáticos

enquadraram-se nas especificações da Shell (2003), foram os que tiveram melhor  $I_c$ , ou seja, possuem os menores valores e, portanto, podem ser considerados os mais estáveis.

Apesar de comprovada eficiência dos produtos, foi ainda verificada a eficácia de tais incorporações de rejuvenescedores no ligante envelhecido, de modo a verificar qual se aproximava mais de um CAP 50/70. Para tal, foi realizada Análise de Variância (ANOVA) onde pares de ligantes foram combinados, na expectativa de verificação do nível de significância, ou seja, o quanto os resultados de um ligante se aproximava de outro.

O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 4.9, em forma de matriz, informando o nível observado de significância “ $p$ ”, obtido na análise para cada um dos pares encontrados.

Tabela 4.9 - Níveis de Significância (p%) de valores de cromatografia - método SARA.

<i>Ligantes</i>	<i>CAP 50/70</i>	<i>CAP20+20% AR5</i>	<i>CAP20+25% AR5</i>
<i>CAP 50/70</i>			
<i>CAP20+20% AR5</i>	98,81%		
<i>CAP20+25% AR5</i>	98,96%	97,84%	

O cruzamento do ligante CAP 50/70 com o CAP20+25% AR5 indica a maior probabilidade de as frações SARA serem fisicamente iguais. Por outro lado, observa-se que o cruzamento do ligante das frações SARA do ligante CAP20+20% de AR5 com o CAP20+25% de AR5 apresenta uma probabilidade de 97,84% de semelhança entre estes. Isto pode ser explicado devido ao fato de que estes ligantes foram modificados com o mesmo rejuvenescedor em porcentagens muito próximas, o que lhes conferiu tamanha semelhança.

A escolha entre um e outro ligante rejuvenescido certamente deverá basear-se numa questão econômica e não técnica, pois qualquer um dos dois materiais conseguiu recuperar as frações leves perdidas durante o processo de envelhecimento ao qual o ligante esteve exposto durante as fases de mistura, transporte, espalhamento, compactação e vida de serviço.

#### 4.2.5.2 - ESPECTROMETRIA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR – RNM

Os espectros de RMN  $^1\text{H}$  e RMN  $^{13}\text{C}$  fundamentaram a observação de qual ligante mais se aproximava de um ligante virgem, que para esta pesquisa foi o CAP 50/70. Observou-se que

todas as configurações avaliadas apresentavam valores dos grupos Saturados e Aromáticos semelhantes aos de um CAP 50/70 tomado como padrão de referência. Entretanto, foram realizadas Análises de Variâncias (ANOVA) combinando pares de ligantes, onde se pretende verificar o nível de significância, ou seja, o quanto os resultados de um ligante rejuvenescido se aproximava do CAP 50/70, comparando estes grupos de compostos Aromáticos e Saturados.

O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 4.10, em forma de matriz, informando o nível observado de significância “*p*”, obtido na análise para cada um dos pares encontrados

Tabela 4.10 - Níveis de Significância (*p*%) de valores de cromatografia - método RMN.

<i>Ligantes avaliados</i>	<i>CAP 50/70</i>
<b>CAP20 + 15% AR 5</b>	<b>99,71%</b>
<b>CAP20 + 20% AR 5</b>	<b>99,8%</b>
CAP20 + 25% AR 5	99,5%
CAP20 + 15% AR 250	99,0%
CAP20 + 20% AR 250	99,4%
<b>CAP20 + 25% AR 250</b>	<b>99,95%</b>
CAP20 + 15% AR500	98,8%
CAP20 + 20% AR 500	98,8%
CAP20 + 25% AR 500	98,76%
CAP20 + 15% RejuvaSeal	97,9%
CAP20 + 20% RejuvaSeal	96,9%
CAP20 + 25% RejuvaSeal	94,3%

Quando comparados, todos os ligantes se aproximaram do CAP 50/70, sendo as seguintes as três melhores combinações em ordem decrescente de probabilidade: CAP20+25% AR250 (*p*=99,95%), CAP20+20% AR5 (*p*=99,8%) e por fim o CAP20+15% AR5 (*p*=99,71%). Entretanto, a escolha entre um dos três ligantes deverá ser baseada naquele que apresentou componentes da fração SARA compatíveis com o CAP 50/70, ou seja, CAP20+20% AR5, uma vez que o ensaio de RMN só separa grupos de compostos aromáticos e saturados.

#### 4.2.6 - AVALIAÇÃO AMBIENTAL

Os ensaios de periculosidade realizados foram os testes de lixiviação, solubilização, análise de massa, inflamabilidade, corrosividade e reatividade. Todos realizados conforme metodologia preconizada nas Normalizações Brasileiras.

A norma brasileira que classifica os resíduos industriais é a NBR-10.004:2004 da ABNT. Esta norma classifica os Resíduos em 2 (duas) classes, quais sejam: Classe I – resíduo perigoso, Classe II – resíduos não perigosos, sendo esta última subdivida em: Classe II A – Não Inertes e Classe II B – Inertes.

Mediante os resultados encontrados nas amostras analisadas os três resíduos em questão (Fresado, Fresado + AR 500, Fresado + Rejuvaseal) foram classificados como sendo de Classe II A – Não Perigoso e Não Inerte, visto que o mesmo não se enquadra nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II-B – Inertes nos termos da norma ABNT NBR 1004:2004. Logo o resíduo isolado ou com mistura de quaisquer dos rejuvenescedores avaliados nesta pesquisa, poderá ser encaminhado para aterros sanitários de resíduos classe II-A, ou mesmo utilizado em projetos de Pavimentação sem restrições quanto a aplicação como um CBUQ.

#### **4.3 - MODELO DE ENVELHECIMENTO DO LIGANTE ASFÁLTICO**

A caracterização do CAP foi feita mantendo-se as amostras de ligante na estufa RTFOT até a degradação limite, como o aumento em 8°C para o ponto de amolecimento, redução de 55% da penetração em relação ao valor inicial e aumento de 50% da viscosidade em relação aos valores obtidos em caracterização inicial.

Como esperado, o aquecimento em estufa RTFOT modificou as propriedades do CAP devido à perda de voláteis e oxidação. Houve ainda aumento da consistência e aumento da temperatura de amolecimento, menor ductilidade e menor recuperação elástica do que inicialmente. A Figura 4.17 representa o comportamento ao longo do tempo das propriedades utilizadas para determinação do modelo de envelhecimento. Os valores de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade apresentados nestas curvas foram normatizados pelo valor inicial antes do amolecimento.

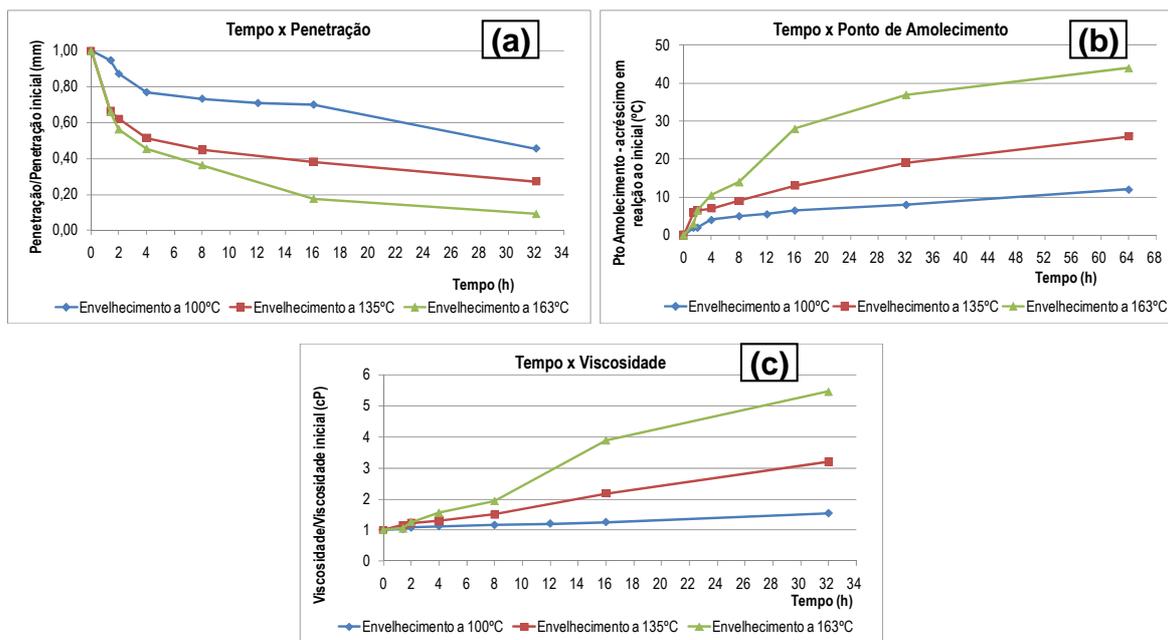


Figura 4.17 - Comportamento ao longo do tempo de envelhecimento: (a) Penetração; (b) Ponto de amolecimento; (c) Viscosidade Brookfield.

A partir das curvas obtidas nos gráficos apresentados acima, algumas vezes por interpolação, foram apurados os tempos críticos para cada parâmetro avaliado, conforme pode ser observado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Tempos críticos verificados durante o envelhecimento

<i>Critério</i>	<i>Limite Adotado</i>	<i>Temperaturas de Incubação</i>		
		<i>100°C</i>	<i>135°C</i>	<i>163°C</i>
Redução da penetração em 50%	26,5mm	28,5h	5h	3h
Aumento do Ponto de Amolecimento em 8°C	54,5°C	39h	8h	3h
Aumento na Viscosidade a 135°C em 50%	578cP	31h	8h	4h

Aplicou-se, de acordo com os tempos observados em função das temperaturas de exposição ao calor e ar, o modelo de Arrhenius, por meio do qual foram obtidas as curvas de envelhecimento para a Penetração (Figura 4.18-a), Ponto de amolecimento (Figura 4.18-b) e Viscosidade (Figura 4.18-c).

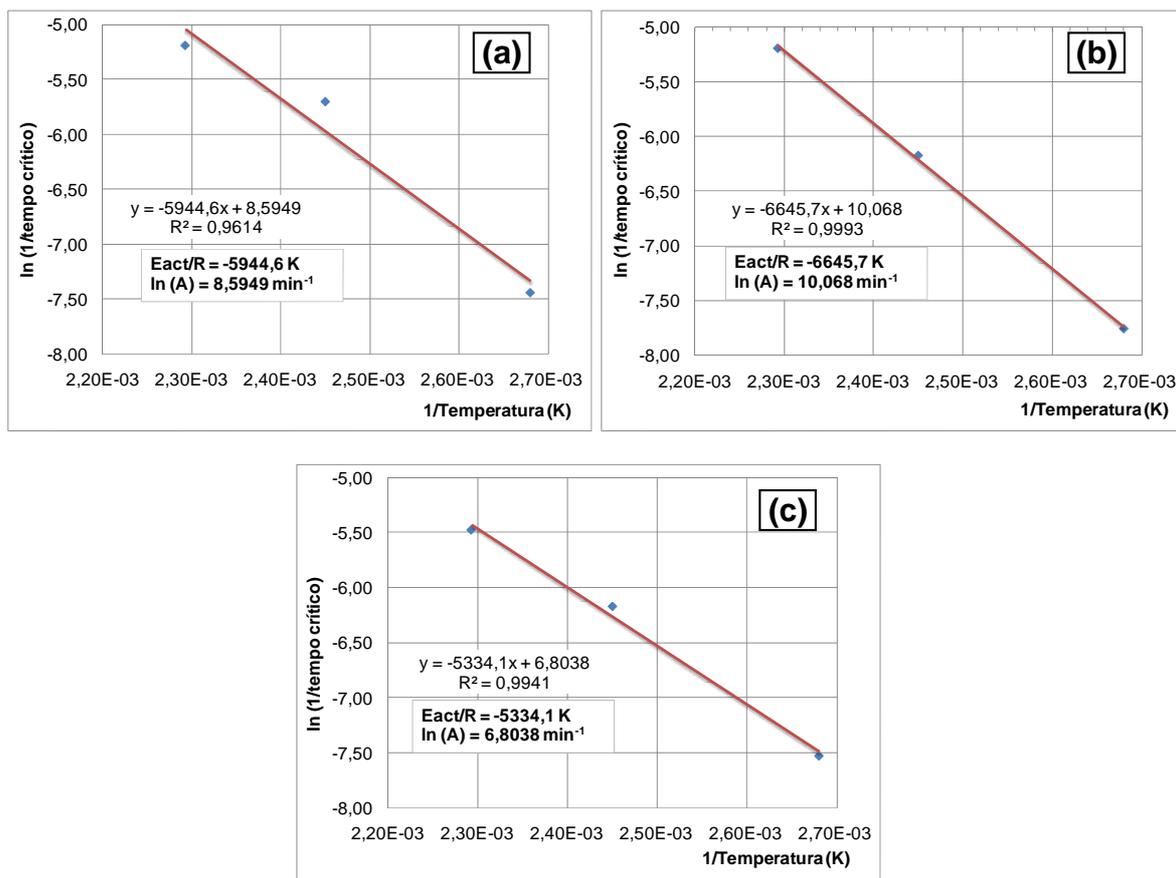


Figura 4.18 - Modelo de envelhecimento: (a) Penetração; (b) Ponto de amolecimento; (c) Viscosidade.

As equações obtidas por regressão linear para as propriedades avaliadas mostram os valores de  $E_{act}/R$  e  $\ln(A)$ , resumidos na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Constantes obtidas após ensaios

<i>Propriedade</i>	$E_{act}/R \text{ (K)}$	$\ln(A)(\text{min}^{-1})$
Penetração	-5944,6	8,5949
Ponto de Amolecimento	-6645,7	10,068
Viscosidade	-5334,1	6,8038

A análise do comportamento das variáveis foi feita também com a determinação do coeficiente de correlação linear de Pearson. Para isso, foram usados os valores dos tempos e das temperaturas necessários para atingir os limites de Penetração, Ponto de Amolecimento e Viscosidade fixados anteriormente. Sendo assim, cada gráfico recebeu uma linha de tendência linear, gerando uma equação do tipo  $y=ax+b$  e um coeficiente de determinação  $R^2$ , chamado também de valor de correlação de Pearson.

Para classificar a correlação existente entre os dados avaliados, foi utilizada uma classificação subjetiva do NCHRP (TRB, 2002) baseada no  $R^2$ , apresentada na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Classificação subjetiva da correlação dos parâmetros avaliados

<b>Classificação</b>	<b><math>R^2</math></b>
Excelente	> 0,90
Boa	0,70 – 0,89
Razoável	0,40 – 0,69
Fraca	0,20 – 0,39
Muito fraca	< 0,19

Observa-se, de acordo com a Figura 4.18, que a temperatura e o tempo de exposição possuem uma correlação negativa e que seus coeficientes são classificados como “Excelente”. Sendo assim, o modelo de envelhecimento encontrado apresenta-se como satisfatório, fundamentando outras conclusões acerca do comportamento durante a usinagem do material.

Após determinar o modelo de envelhecimento para as três principais características do material (Penetração, Ponto de amolecimento e Viscosidade), foram extrapoladas as temperaturas de exposição, obedecendo ao limite máximo de variação de 40°C acima e abaixo das temperaturas utilizadas em laboratório.

A extrapolação foi realizada baseada nas equações obtidas em cada modelo de envelhecimento. Isso resultou em tempos necessários para que a Penetração atingisse o limite de 26,5 mm, o Ponto de Amolecimento limite de 54,5°C e a viscosidade de 577cP (a 135°C a 20rpm) para as temperaturas de exposição pré-estabelecidas, conforme mostrado na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - temperatura versus tempo de exposição obtidos

<b>Temp. de Usinagem (°C)</b>	<b>Tempo máximo de exposição à temperatura (horas)</b>		
	<b>Viscosidade</b>	<b>Penetração</b>	<b>Ponto amolecimento</b>
130	10,31	7,82	10,20
140	7,48	5,47	6,84
150	5,52	3,89	4,68
160	4,12	2,81	3,26
170	3,12	2,07	2,30
180	2,39	1,54	1,65

Os resultados obtidos na Tabela 4.14 fundamentaram a construção de uma curva temperatura *versus* tempo de exposição, conforme ilustrado na Figura 4.19.

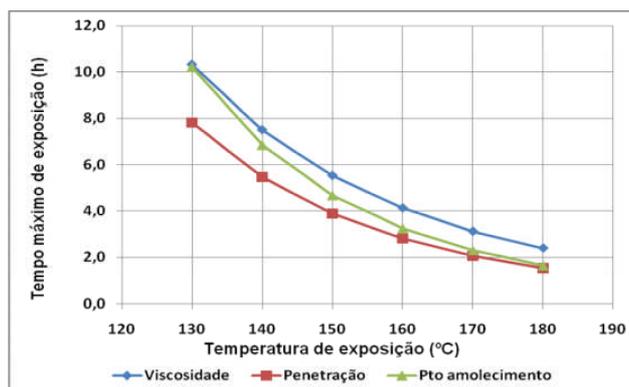


Figura 4.19 - Modelo de Envelhecimento: tempo *versus* temperatura de exposição.

De acordo com a Figura 4.19, quando fixada uma dada temperatura, é possível observar que o tempo de exposição fará com que a penetração seja a primeira característica a atingir o valor limite pré-estabelecido. Assim, é necessário atentar-se para o tempo máximo em que o material poderá ficar exposto a uma determinada temperatura, desde o período em que o ligante é aquecido após sair da refinaria, do início da mistura até o início da compactação em campo. Este tempo e temperatura são essenciais para que o limite máximo preconizado nas especificações técnicas não seja atingido e, assim, não haja comprometimento do material a ser empregado no revestimento asfáltico.

Observa-se, assim, que o material avaliado, quando exposto a uma temperatura de 150°C, poderá permanecer assim por no máximo 4,0 horas, para que a Penetração não atinja o limite máximo de 26,5 mm, conforme Resolução ANP Nº 19 de 11/07/2005. Neste exemplo, a viscosidade e o ponto de amolecimento permanecerão dentro dos limites, pois a exposição demanda um tempo superior às 4h para aumentar em 50% seus valores iniciais.

#### 4.4 - EFEITO SELANTE DE AGENTE REJUVENESCEDOR

A verificação do efeito selante da superfície asfáltica foi realizado por meio de avaliação visual e mecânica. Desse modo, foi possível observar que o revestimento com agente rejuvenescedor à base de alcatrão (RejuvaSeal) impede que agentes agressores, como água e combustíveis, penetrem na capa asfáltica, causando comprometimento estrutural.

#### 4.4.1 - AVALIAÇÃO VISUAL

Imediatamente após imersão na gasolina, as amostras não seladas sofreram desgaste superficial, com perda de massa de 3% (finos). Para os corpos de prova selados com RejuvaSeal (Figura 4.20-d), entretanto, essa perda foi de apenas 0,3%, isto é, dez vezes menor do que na situação em que não foram selados. De acordo com a norma europeia EN 12697-43, ambas as configurações foram classificadas como amostras com resistência boa a moderada à ação destes produtos químicos.

Na Figura 4.20-a é possível observar os resíduos (material granular fino) no recipiente onde permaneceram submersas em gasolina as amostras sem selagem, que sofreram notável desgaste superficial (Figura 4.20-c). As superfícies das amostras seladas com RejuvaSeal, inseridas no recipiente mostrado na Figura 4.20-b, entretanto, permaneceram praticamente sem alterações, o que fica evidente na Figura 4.20-d.

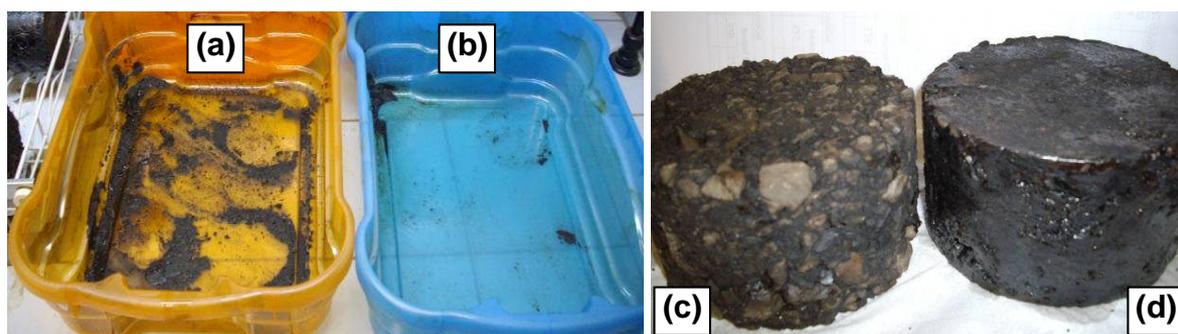


Figura 4.20 - Recipientes utilizados para amostras: (a) Não seladas; (b) Seladas – Alteração dos corpos de prova após imersão em gasolina: (c) Sem selagem; (d) Selados

Nota-se que o rejuvenescedor desempenhou função selante, impedindo o agente químico de degradar a superfície do corpo de prova. Ensaios mais precisos, entretanto, foram realizados no intuito de verificar se a integridade estrutural da mistura foi afetada pelo ataque químico ao qual fora submetida.

Outra diferença entre os corpos de prova selados (Figura 4.21-a) e aqueles que não foram protegidos com o RejuvaSeal (Figura 4.21-b) pode ser observada após os ensaios de Resistência à Tração. Os corpos de prova não selados apresentaram ruptura por diferentes planos; nas amostras seladas, entretanto, a ruptura foi obtida por um plano preferencial

(Figura 4.21-a).

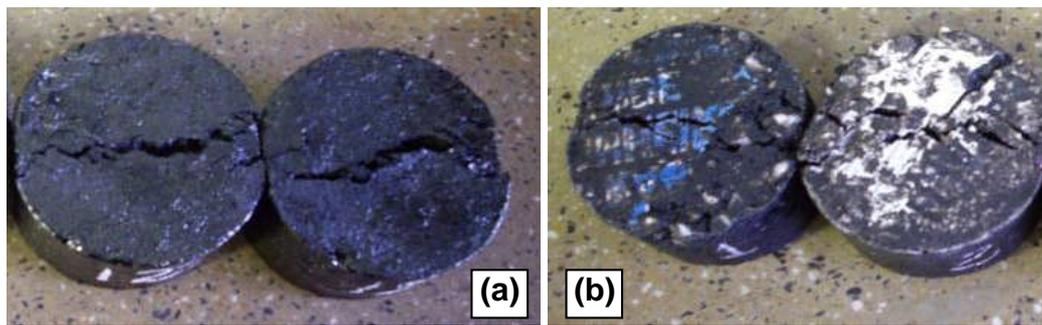


Figura 4.21 - Planos de ruptura dos corpos de prova: (a) Com tratamento; (b) Sem tratamento

#### 4.4.2 - AVALIAÇÃO MECÂNICA

Após a realização dos ensaios com corpos de prova de referência, tanto para a configuração em estado natural, quanto para situações em que estes foram selados com RejuvaSeal, foram realizados ensaios de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência com outras amostras submetidas ao ataque químico da água e gasolina. Para representar melhor o comportamento dos dados, optou-se por utilizar a mediana, pois os valores obtidos apresentavam-se com elevada variabilidade. Nestes ensaios, foram colhidos os dados exibidos na Figura 4.22 na forma de gráficos de caixa (*Box Plot*), onde são mostrados a mediana e o 1º e 3º percentis.

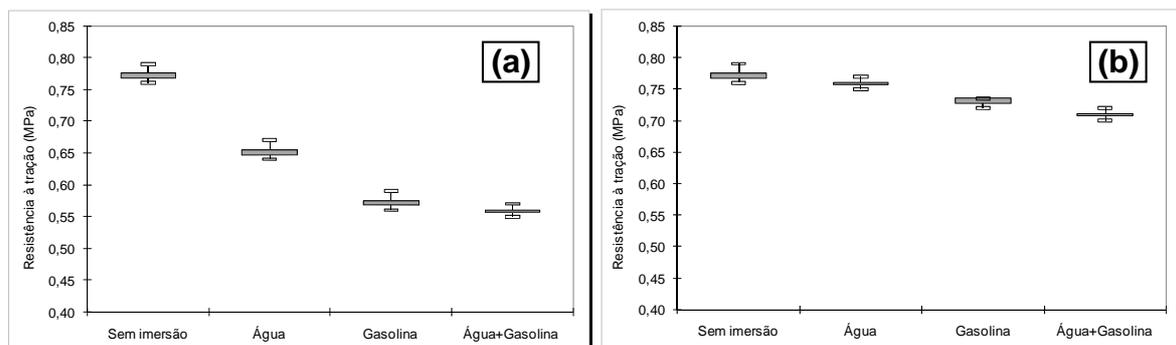


Figura 4.22 - *Box Plot* dos valores de Resistência à Tração – Corpos de prova: (a) Sem selagem; (b) Com selagem

Observa-se, após imersão em água a 60°C, que os corpos de prova não selados com o rejuvenescedor sofreram redução da Resistência à Tração da ordem de 16% quando comparados ao valor de referência, ou seja, ao corpo de prova sem imersão. Em contrapartida,

verificou-se que os corpos de prova que receberam selagem com RejuvaSeal sofreram redução da Resistência à Tração da ordem de 3% apenas. Fica notório, assim, que o efeito selante do rejuvenescedor diminuiu o potencial de agressão do agente químico na ordem de 13%.

Após imersão em gasolina, o valor de Resistência à Tração sofreu decréscimo substancial quando comparado ao valor de referência. Foi reduzido em 25% para a configuração sem selagem e em 6% para os corpos de prova cobertos por RejuvaSeal, o que representa uma diminuição de 19% do potencial agressor.

No ataque químico combinado de água+gasolina, observou-se que, para os corpos de prova selados, a redução da Resistência à Tração foi de 30%. Já para a configuração selada com “RejuvaSeal”, o decréscimo foi de apenas 10%, o que significa redução de 20% do potencial agressor.

Foi realizada, utilizando Análise de Variância (ANOVA), avaliação estatística envolvendo comparações entre as grandezas obtidas durante os ensaios mecânicos realizados em laboratório. Com nível de confiança de 95%, os resultados mostraram que os valores de Resistência à Tração obtidos para as configurações estudadas não apresentaram boa relação, indicando que os agentes químicos agressores agem de maneira distinta para esta característica mecânica dos corpos de prova avaliados.

Os resultados de Módulo de Resiliência para as configurações estudadas são apresentados na Figura 4.23 na forma de gráficos de caixa, onde são mostrados a mediana e o 1º e 3º percentis.

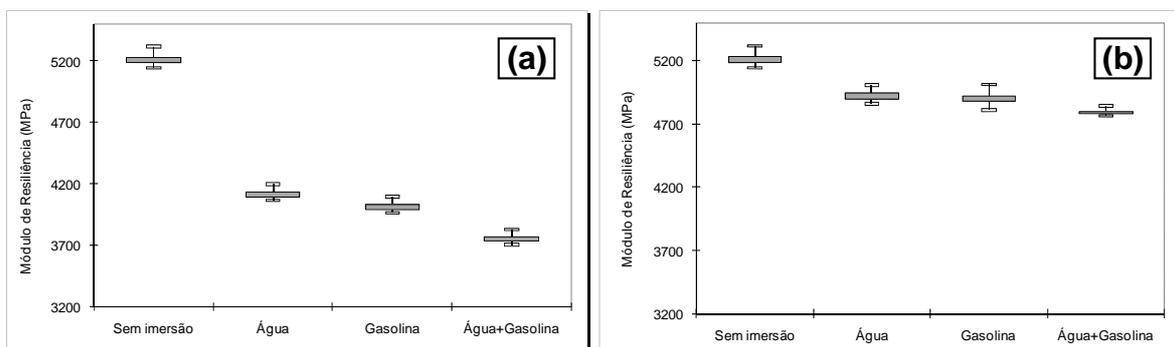


Figura 4.23 - Box Plot dos valores de Módulo de Resiliência – Copos de prova: (a) Sem selagem; (b) Com selagem

Como indica a Figura 4.23, na imersão em água a 60°C, os corpos de prova que não receberam selagem com o rejuvenescedor tiveram uma redução no Módulo de Resiliência da ordem de 21% quando comparados ao valor de referência obtido para o corpo de prova natural (CBUQ padrão). No mesmo ensaio, aqueles que foram revestidos com o RejuvaSeal, por outro lado, sofreram redução no Módulo de Resiliência da ordem de 6% comparados ao valor de referência. Nota-se que o potencial agressor do agente químico foi reduzido em 15%, comprovando a eficácia e a eficiência do rejuvenescedor.

Quando os corpos de prova foram submetidos ao ataque da gasolina, o valor do Módulo de Resiliência sofreu decréscimo significativo quando comparado ao valor de referência. Houve decréscimo de 23% para a configuração sem selagem e de 6% para os corpos de prova cobertos por RejuvaSeal, o que significa redução de 17% do potencial agressor.

Para a configuração em que os corpos de prova foram expostos à combinação de água+gasolina, observa-se pelos gráficos que as amostras não seladas tiveram redução no Módulo de Resiliência de 28%. Já para a configuração selada com RejuvaSeal o decréscimo foi de apenas 8% – uma diferença de 20% na capacidade resistir ao ataque do agente químico.

A Análise de Variância (ANOVA), realizada com nível de confiança de 95%, indicou que os agentes agressores “água” e “gasolina” apresentaram comportamento 80% semelhante em relação ao decréscimo do valor de referência adotado, enquanto os valores observados para Resistência à Tração não apresentaram nível de significância considerável. Esta observação mostrou que os agentes agressores podem agir de maneira semelhante ou diferente de acordo com o parâmetro de resistência ao qual se queira estudar.

#### **4.5 - REJUVENESCIMENTO DE MISTURA ASFÁLTICA ENVELHECIDA**

Utilizaram-se, para os ensaios de caracterização mecânica das misturas asfálticas recicladas, cinco configurações de misturas de CBUQ com diferentes teores de aditivos (15%, 20%, 25%) e uma mistura asfáltica sem a presença de aditivos, assim definidas:

- Mistura 1: 100% de fresado;
- Mistura 2: 100% fresado+AR-5;

- Mistura 3: 100% fresado+AR-250;
- Mistura 4: 100% fresado+AR-500;
- Mistura 5: 100% fresado+“RejuvaSeal”;
- Mistura 6: 100% fresado+CAP 50/70;
- Mistura 7: Mistura nova (agregado novo+CAP 50/70).

Inicialmente, os corpos de prova moldados foram avaliados quanto aos parâmetros físicos de Volume de Vazios (Vv) e Relação Betume-Vazios (RBV). Os valores obtidos encontram-se dispostos na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Índices físicos para misturas avaliadas.

<i>Parâmetro</i>	<i>% aditivo</i>	<i>RejuvaSeal</i>	<i>AR-5</i>	<i>CAP</i>	<i>AR-250</i>	<i>AR-500</i>	<i>Mistura nova</i>	<i>Fresado Natural</i>
<b>Vv (3 a 5%)</b>	<b>15%</b>	3,1	3,8	3,4	3,7	3,4	3,8	3,61
	<b>20%</b>	3,0	3,6	3,2	3,5	3,1		
	<b>25%</b>	3,0	3,4	3,0	3,2	3,0		
<b>RBV (75 a 82)</b>	<b>15%</b>	81,4	78,7	78,8	75,4	78,0	79,0	76,0
	<b>20%</b>	82,0	81,1	79,5	77,7	80,3		
	<b>25%</b>	81,6	82,0	81,2	80,81	81,4		

De acordo com a norma DNIT ES-031/2004, todas as misturas apresentaram volume de vazios e relação betume-vazios satisfatórios quando comparados à respectiva norma. Apesar disso, conclusões mais apuradas só poderão ser estabelecidas após avaliação da resistência mecânica por meio dos ensaios de estabilidade Marshall, Resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Fadiga.

#### **4.5.1 - ESTABILIDADE MARSHALL E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO**

Os corpos de prova, inicialmente, foram submetidos ao ensaio de Estabilidade e Fluência na prensa Marshall, no intuito de verificar a carga máxima (estabilidade) e respectivo deslocamento (fluência) durante o carregamento. Posteriormente, foram realizados ensaios de Resistência à Tração para estimativa aproximada da tensão máxima de ruptura das misturas, além de estimar as tensões que poderiam ser utilizadas nos ensaios de Módulo de Resiliência e fadiga por compressão diametral dinâmica. Os gráficos com os resultados obtidos são

apresentados na Figura 4.24, Figura 4.25e na Figura 4.26.

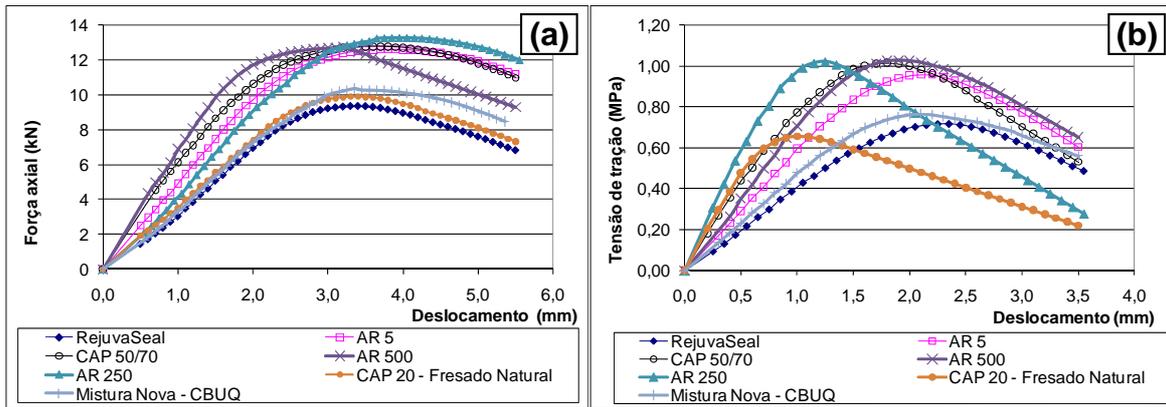


Figura 4.24- (a) Estabilidade Marshall e (b) Resistência à Tração para amostras com 15% de rejuvenescedor.

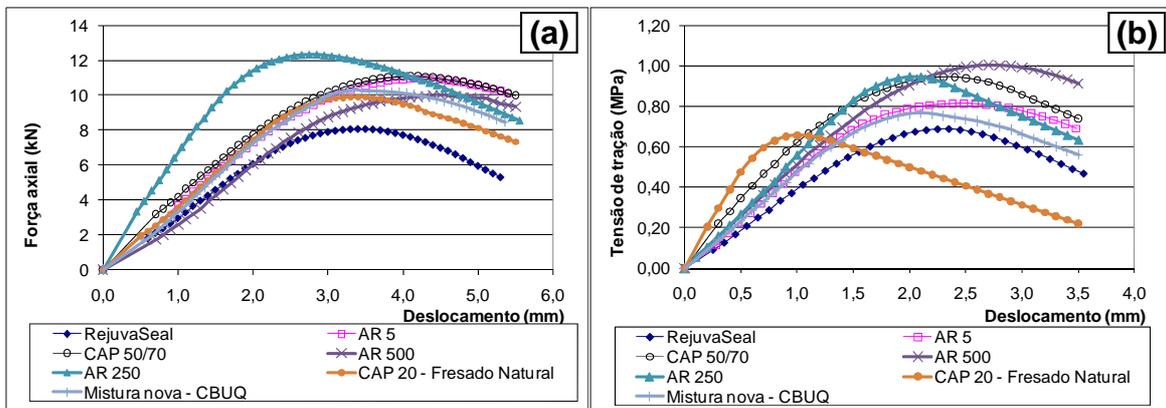


Figura 4.25. (a) Estabilidade Marshall e (b) Resistência à Tração para amostras com 20% de rejuvenescedor

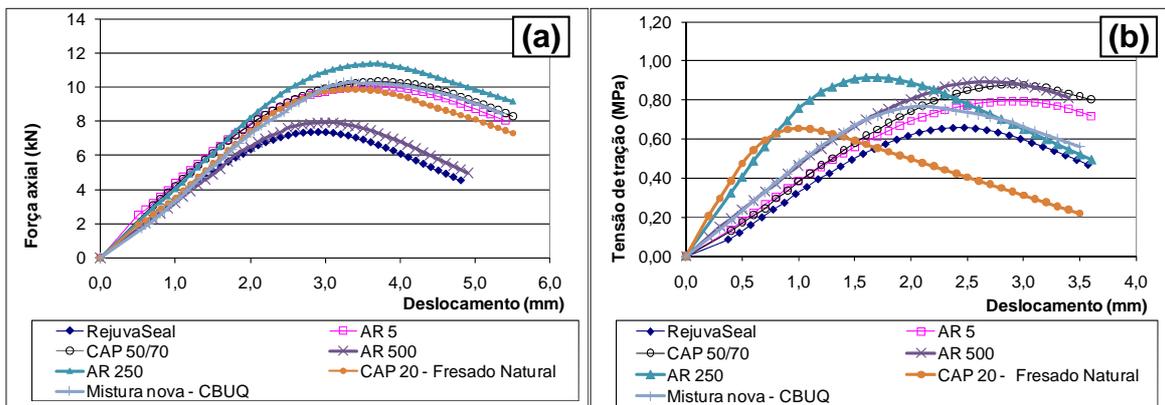


Figura 4.26. (a) Estabilidade Marshall e (b) Resistência à Tração para amostras com 25% de rejuvenescedor

Os ensaios de Resistência à Tração e Estabilidade Marshall não se limitam em determinar um valor numérico. Para misturas que tenham recebido algum aditivo, é interessante verificar o comportamento da ruptura, seja ela dúctil ou frágil. O mecanismo de ruptura dúctil geralmente é melhor, pois uma fratura frágil ocorre subitamente e catastróficamente, sem qualquer aviso, o que é uma consequência da propagação de trincas de maneira espontânea e rápida (Souza, 2010).

Por outro lado, uma fratura dúctil apresenta presença de deformação plástica, ou seja, é possível observar a fratura iminente, permitindo que medidas preventivas sejam tomadas. Além disso, a energia necessária para induzir a fratura dúctil, em materiais dúcteis, é geralmente maior. Assim os ensaios aqui conduzidos também registraram os deslocamentos durante a ruptura de cada corpo de prova, para evidenciar o comportamento de ruptura das amostras e a energia desprendida durante o processo de ruptura, medida indicativamente pela área sob as respectivas curvas tensão-deslocamento. A Figura 4.27 e a Figura 4.28 ilustram o mecanismo de determinação da energia desprendida necessária durante o processo de ruptura das configurações estudadas nesta pesquisa.

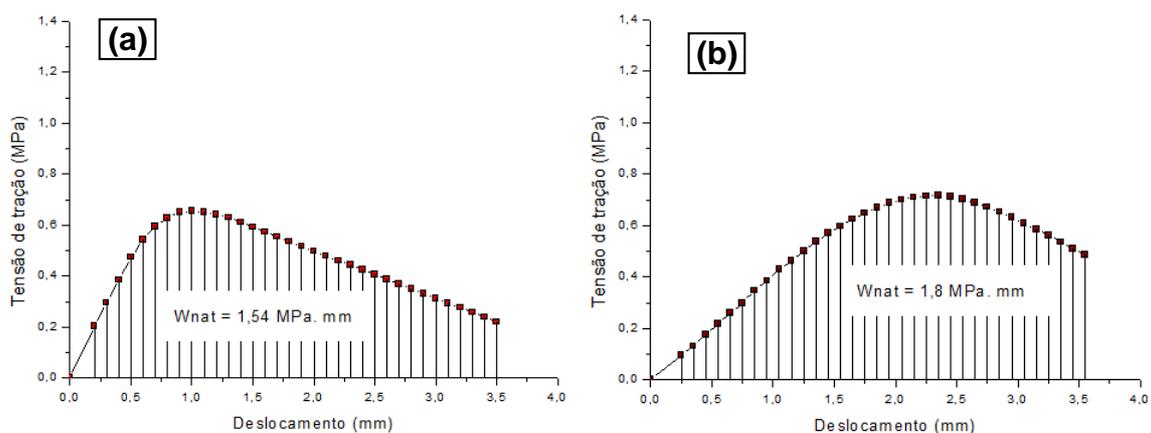


Figura 4.27 - Gráfico de área entre a resistência à tração média versus deslocamento para duas condições avaliadas: (a) Fresado Natural (CAP20), (b) Fresado+15% de RejuvaSeal.

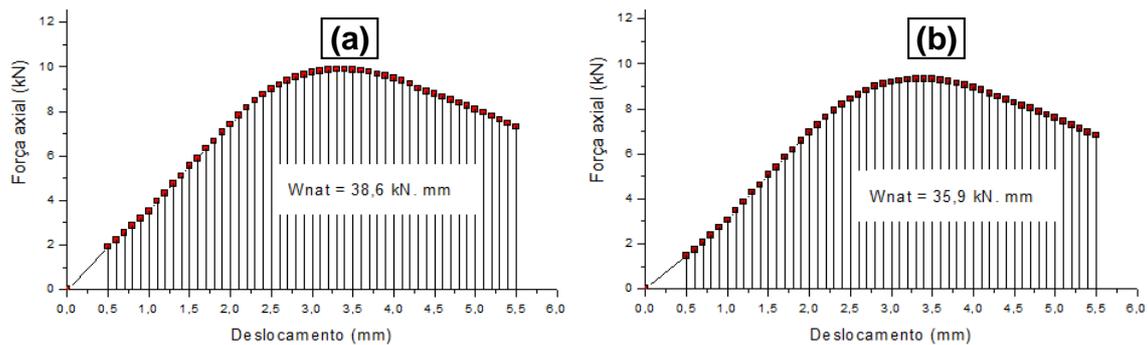


Figura 4.28 - Gráfico de área entre a Estabilidade Marshall média versus deslocamento para duas condições avaliadas: (a) Fresado Natural (CAP20), (b) Fresado+15% de RejuvaSeal.

Todas as configurações estudadas tiveram calculadas as energias desprendidas durante o processo de ruptura até o deslocamento de 3,5mm para resistência à tração e 4,5mm para Estabilidade Marshall, apresentadas na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Energia desprendida durante o processo de ruptura.

<b>Parâmetro</b>	<b>% aditivo</b>	<b>RejuvaSeal</b>	<b>AR-5</b>	<b>CAP</b>	<b>AR-250</b>	<b>AR-500</b>	<b>Mistura nova</b>	<b>Fresado Natural</b>
<b>Estabilidade Marshall (J)</b>	<b>15%</b>	35,9	39,8	42,5	39,8	43,3		
	<b>20%</b>	29,8	32,0	33,6	42,6	27,3	31,8	38,6
	<b>25%</b>	24,8	32,3	32,5	34,7	24,6		
<b>Resistência à Tração (J)</b>	<b>15%</b>	1,8	2,3	2,5	2,3	2,6		
	<b>20%</b>	1,7	2,1	2,4	2,2	2,4	1,9	1,5
	<b>25%</b>	1,3	1,8	2,1	2,3	2,2		

Apesar de exibirem valores elevados para Estabilidade e Resistência à Tração, as amostras de fresado sem adição de rejuvenescedor apresentaram ruptura brusca. As demais amostras para as configurações em que foram adicionados aditivos ao material fresado apresentaram ruptura mais dúctil, tendo valores de energia decrescentes com o acréscimo de aditivo, exceto para o RejuvaSeal que apresentou comportamento semelhante para todas as porcentagens utilizadas. Essa situação pode ser evidenciada nos resultados apresentados na Tabela 4.16, nos quais é possível verificar que o incremento de aditivo na mistura asfáltica para todas as configurações e porcentagens estudadas faz com que haja uma “suavização” nas respectivas curvas de Estabilidade Marshall e Resistência à Tração.

A partir dos gráficos apresentados na Figura 4.24, Figura 4.25 e na Figura 4.26 ainda foi possível determinar qual a carga de ruptura para cada ensaio, conforme disponível na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Resumo dos resultados de Estabilidade Marshall e Resistência à Tração

<i>Parâmetro</i>	<i>% aditivo</i>	<i>RejuvaSeal</i>	<i>AR-5</i>	<i>CAP</i>	<i>AR-250</i>	<i>AR-500</i>	<i>Mistura nova</i>	<i>Fresado Natural</i>
<b>Estabilidade (KN)</b>	<b>15%</b>	9,3	12,6	12,7	13,2	12,7		
	<b>20%</b>	8,0	10,9	11,0	12,3	10,0	10,6	9,8
	<b>25%</b>	7,3	10,1	10,3	11,3	7,9		
<b>RT (MPa)</b>	<b>15%</b>	0,70	0,96	1,02	1,02	1,03		
	<b>20%</b>	0,68	0,81	0,95	0,95	1,00	0,77	0,66
	<b>25%</b>	0,65	0,79	0,88	0,91	0,89		

Constata-se, ao observar os resultados, que todas as configurações avaliadas atendem ao quesito mínimo de estabilidade, igual a 5,0kN.

Verifica-se, ainda, que o acréscimo de aditivo à mistura faz com que os valores de Estabilidade Marshall e Resistência à Tração sejam sensivelmente reduzidos. Este fato pode ser explicado devido à recuperação das frações leves do ligante envelhecido, conforme apresentado na avaliação química dos mesmos, fazendo com que a mistura se torne novamente mais flexível e também com menor resistência. Embora a queda de resistência seja um fator negativo, a recuperação da flexibilidade da mistura, por outro lado, é altamente favorável para projetos de pavimentação do ponto de vista de vida de fadiga. Além do mais é desejável que o pavimento não sofra ruptura frágil e brusca após um carregado além do limite de resistência, o que geralmente ocorre com pavimentos em que as misturas são extremamente rígidas.

#### 4.5.2 - MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O módulo de resiliência foi determinado em corpos de prova moldados em laboratório, e ensaiado a 25°C,. Conforme preconizado na norma brasileira, em todas as misturas foi utilizada uma carga que em nenhum caso ultrapassou o limite de 30% da Resistência à Tração. Os resultados obtidos para as três misturas analisadas encontram-se resumidos na Tabela 4.18. Estes valores apresentados são a média aritmética de três corpos de prova (CPs)

dentro do intervalo determinado pela distribuição “t” de “Student”.

Tabela 4.18. Valores médios dos módulos de resiliência das misturas estudadas

<i>Parâmetro</i>	<i>% aditivo</i>	<i>RejuvaSeal</i>	<i>AR-5</i>	<i>CAP</i>	<i>AR-250</i>	<i>AR-500</i>	<i>Mistura nova</i>	<i>Fresado Natural</i>
<i>MR (MPa)</i>	<i>15%</i>	2957	4860	4335	5159	5291	5230	2718
	<i>20%</i>	2569	4673	3853	4945	4436		
	<i>25%</i>	2313	4216	3334	4124	4097		

Apesar de não ser padronizado pelas normas brasileiras, o valor do Módulo de Resiliência é importante enquanto se estuda uma mistura asfáltica para uso em pavimentação. Quando se compara os resultados com o MR de uma mistura nova do tipo CBUQ (5230 MPa) é possível observar que os valores aqui obtidos para as configurações AR-5, AR-250, AR-500 e CAP para adição de 15 ou 20 %, apresentaram-se muito próximos aos valores encontrados na literatura especializada, geralmente na faixa de 3000 a 6000 MPa.

Além disso, nota-se, como no ensaio de Resistência à Tração, o aumento na porcentagem de aditivo adicionado ao fresado fez com que as misturas apresentassem valores de módulos inferiores quando comparados ao valor de referência do material fresado natural. Este comportamento também pode ser explicado pelo fato de que os aditivos recuperaram as frações leves do ligante asfáltico envelhecido, fazendo com que as misturas tornem-se mais flexíveis, o que favorece sua utilização em projetos de pavimentação.

#### **4.5.3 - VIDA DE FADIGA**

Além dos módulos de resiliência, um importante dado utilizado para dimensionamento mecânico de um pavimento é a curva de fadiga, a qual permite prever quantos ciclos de carga determinada estrutura poderá suportar, o que será comparado com o tráfego real previsto para o segmento. De forma geral, a curva de fadiga de cada material pode ser comparada com a de outras misturas para indicar qual das misturas terá melhor comportamento em um pavimento, comparando-se arranjos estruturais iguais e analisando-se as tensões geradas com substituição do material do revestimento em cada caso, representado pelo seu módulo de resiliência.

O ensaio realizado para estimar a vida de fadiga das misturas avaliadas nesta pesquisa consistiu na aplicação de pulsos de carga, com frequência de 1s, sendo 0,1s correspondentes ao tempo de aplicação da carga e 0,9s correspondente ao tempo de descanso. Os carregamentos utilizados foram um percentual da resistência à tração referente a cada mistura (30%, 40% e 50% de RT), devido ao tempo disponível para execução dos ensaios.

Para cada nível de tensão foram ensaiados de três a quatro corpos de prova, a depender da dispersão dos resultados. Foram realizados ensaios à tensão controlada, cujo critério de fadiga está associado à fratura total da amostra, em condições térmicas em torno de  $25 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

O desempenho apresentado pelas misturas com adição de 15%, 20% e 25% de aditivos rejuvenescedores, sob esforços repetitivos, é visualizado na Figura 4.29, Figura 4.30 e na Figura 4.31 num gráfico log-log. Tem-se nas abscissas a diferença de tensão (diferença entre a tensão de tração e tensão de compressão, ambas solicitadas no centro do corpo de prova) e nas ordenadas o número de solicitações (N).

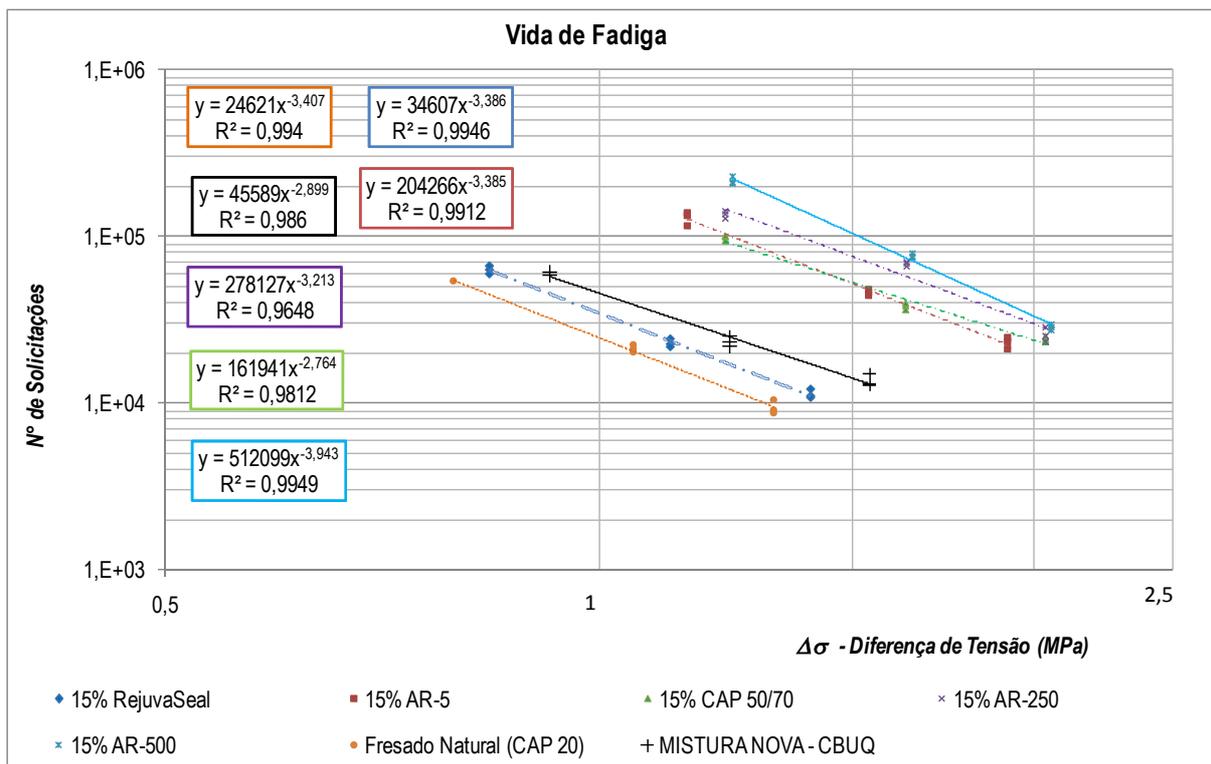


Figura 4.29 - Curvas da vida de fadiga das misturas com 15% de rejuvenescedores

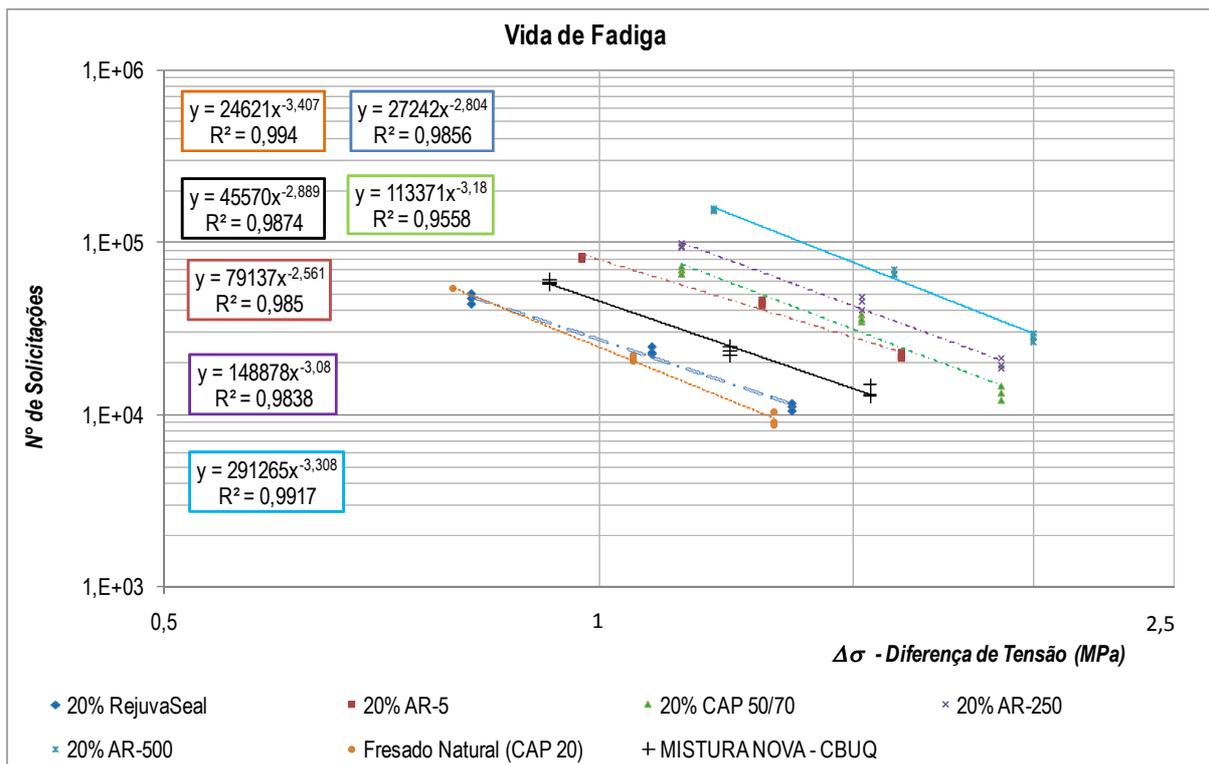


Figura 4.30 – Curvas da vida de fadiga das misturas com 20% de rejuvenescedores

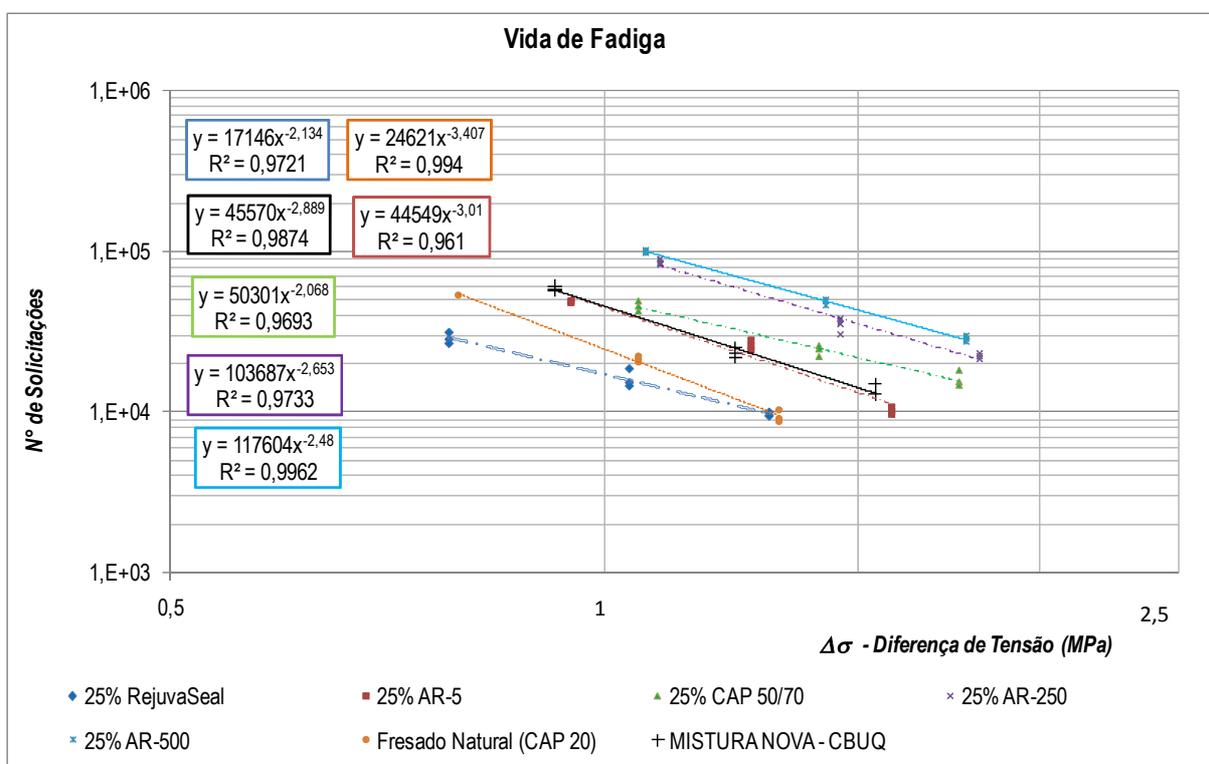


Figura 4.31 - Curvas da vida de fadiga das misturas com 25% de rejuvenescedores

É possível observar que os resultados aqui apresentados para as três porcentagens de adição de rejuvenescedores possuem baixa dispersão, apresentado  $R^2$  próximos de um. Para a vida de fadiga, as misturas cujos materiais são mais viscosos (AR-500) apresentam uma tendência de terem maiores valores que as misturas com materiais menos viscosos, como o RejuvaSeal. Este acréscimo de vida a fadiga fica mais evidente para tensões maiores.

Apesar de apresentar os melhores resultados de vida de fadiga, o material fresado em estado natural não poderia assim ser utilizado, uma vez que o material não possui características químicas do ligante (frações SARA) conforme recomendação do manual SUPERPAVE, sendo necessário recuperá-las no intuito de prolongar a vida útil do pavimento. Além do mais a vida de fadiga em campo é dependente também da rigidez do material, a qual também afeta o nível de tensões que será observado na camada de revestimento em função de sua rigidez relativa comparando-se com as demais camadas que compõem a estrutura do pavimento.

Os materiais reciclados do fresado que tiveram vida de fadiga mais próxima à de uma mistura nova do tipo CBUQ foram obtidos com adição de 15% de AR-5 ou RejuvaSeal, 20% de AR-5, seguido das misturas com adição de 25% de AR-5 ou CAP 50/70. Aqui fica evidente que a mistura de 20 ou 25% de AR-5 cuja recuperação das frações SARA tiveram o melhor desempenho também produz os melhores resultados de vida de fadiga.

A Tabela 4.19 apresenta os valores de  $k_2$ ,  $n_2$  e  $R^2$  referentes à Equação 3.15. Estes parâmetros são obtidos a partir da regressão dos dados de ensaio que compõe a curva de fadiga para cada mistura.

Tabela 4.19 - Valores dos coeficientes  $k_2$ ,  $n_2$  e do coeficiente de determinação  $R^2$

<b><i>Aditivos</i></b>	<b><i>% aditivo</i></b>	<b><i>k<sub>2</sub></i></b>	<b><i>n<sub>2</sub></i></b>	<b><i>R<sup>2</sup></i></b>
<b><i>RejuvaSeal</i></b>	<b><i>15%</i></b>	34607	3,385	0,9946
	<b><i>20%</i></b>	27242	2,804	0,9856
	<b><i>25%</i></b>	17146	2,134	0,9721
<b><i>AR-5</i></b>	<b><i>15%</i></b>	204266	3,385	0,9912
	<b><i>20%</i></b>	79137	2,561	0,985
	<b><i>25%</i></b>	44549	3,01	0,961
<b><i>CAP 50/70</i></b>	<b><i>15%</i></b>	161941	3,385	0,9812
	<b><i>20%</i></b>	113371	3,18	0,9558
	<b><i>25%</i></b>	50301	2,058	0,9693

	<b>15%</b>	278127	3,213	0,9648
<b>AR-250</b>	<b>20%</b>	148878	3,08	0,9838
	<b>25%</b>	103687	2,653	0,9733
	<b>15%</b>	512099	3,943	0,9949
<b>AR-500</b>	<b>20%</b>	291265	3,308	0,9917
	<b>25%</b>	117604	2,48	0,9962
	<b>Mistura Nova</b>	<b>N.A.</b>	45589	2,899
<b>Fresado Natural</b>	<b>N.A.</b>	24621	3,407	0,994

Apesar de observado nesta seção quais as misturas que se comportam mais próximo a um CBUQ convencional novo, é necessário realizar análises em um sistema de várias camadas, verificando o comportamento estrutural como um todo (revestimento+camadas subjacentes) e avaliando então se esta mistura possui um desempenho satisfatório ou não.

#### 4.5.4 - ANÁLISE MECANÍSTICA

Para dimensionamento de um pavimento usando métodos numéricos ou analíticos é necessário que se definam basicamente: a geometria do problema, as condições de contorno (carga e deslocamento) e as propriedades dos materiais. Então para uma avaliação mecânica de um pavimento é de suma importância a determinação de parâmetros de deformabilidade e de resistência a partir dos ensaios mecânicos a serem efetuados nas misturas naturais e modificadas.

Com os resultados obtidos da campanha laboratorial, em forma de parâmetros, foi possível realizar a análise paramétrica a partir do modelo teórico, baseado na teoria elástica de múltiplas camadas, já implementado no programa KENLAYER (Huang, 1993). A opção por adotar este programa é justificada por seu baixo tempo de processamento e por sua fácil utilização. A partir de uma estrutura hipotética de um pavimento tipo foi possível avaliar e comprovar alguns resultados já obtidos durante a campanha experimental para o tipo de mistura estudada.

#### 4.5.4.1 - ESTRUTURA DE PAVIMENTO E CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO

Para avaliar o desempenho dos diversos materiais estudados em laboratório no contexto de um pavimento, adotou-se com uma estrutura hipotética típica, com materiais utilizados nas vias construídas no Distrito Federal. O modelo de pavimento estudado é composto por três camadas: uma camada de CBUQ, utilizando os materiais avaliados nesta pesquisa, uma base de cascalho laterítico e um sub-leito argiloso (argila porosa de Brasília). A Figura 4.32 mostra os aspectos geométricos do modelo, com todas as camadas e os respectivos parâmetros de cada camada, além de demonstrar a forma de carregamento (eixo simples padrão) aplicada nas análises.

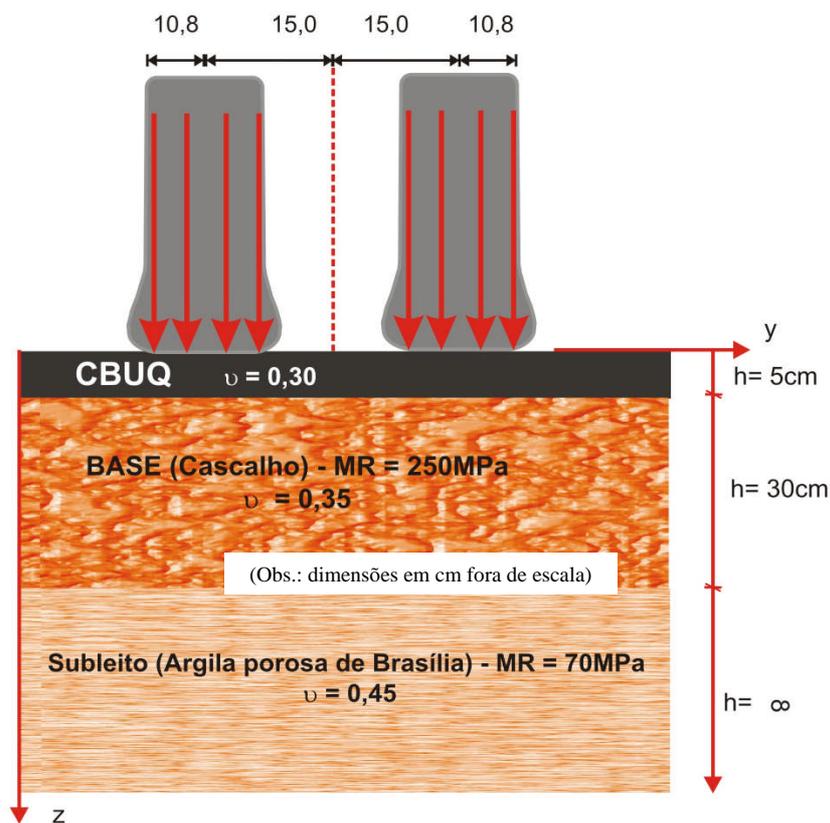


Figura 4.32 - Perfil típico utilizado nas análises paramétricas e os parâmetros utilizados

A avaliação da camada composta pela mistura do tipo CBUQ nas diversas configurações, foi realizada com o perfil em estudo sob a perspectiva da teoria da elasticidade linear, utilizando o módulo de resiliência como o único parâmetro experimental, e o coeficiente de Poisson fixo e igual  $\nu=0,30$ , como comumente utilizado em projetos de pavimentação (Souza, 2010).

Foram estabelecidos dois pontos (P1 e P2) a serem avaliados, sendo um abaixo da roda do veículo (carga) e outro entre as duas rodas representativas de um eixo simples padrão que transmite ao pavimento uma carga total de 8,2 toneladas (80 kN). Neste eixo a superfície de contato dos pneus com o pavimento é representada por uma área circular de 10,8 cm de raio e tensão de contato de 0,56 MPa. Para os pontos P1 e P2 as análises foram realizadas na fibra inferior da camada de rolamento (CBUQ) a uma cota  $z = 5\text{cm}$ . A Figura 4.33 mostra o esquema com os pontos de análise utilizado.

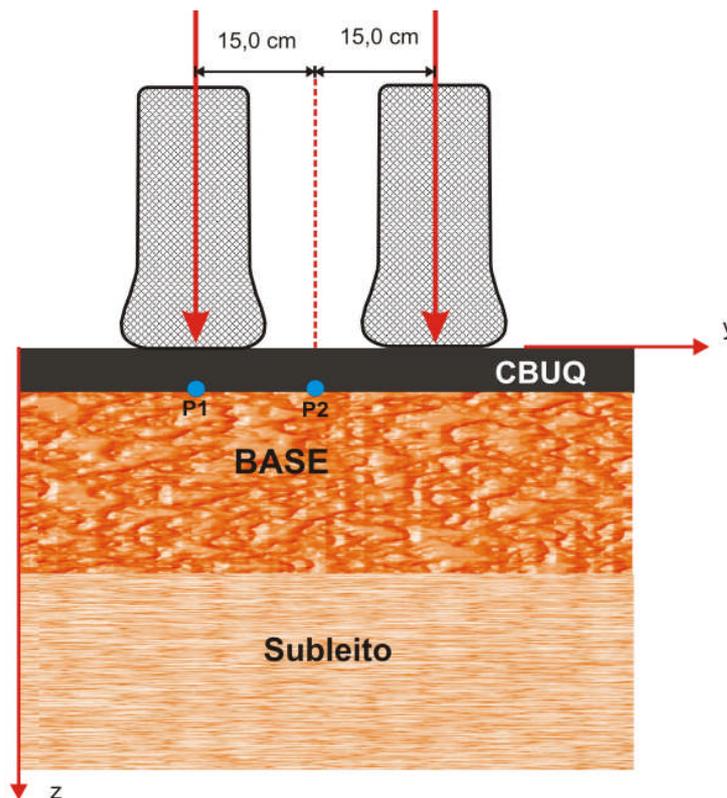


Figura 4.33 - Esquema dos pontos de análise utilizados nas análises paramétricas

Foram realizadas duas análises para os pontos aqui demonstrados, onde a primeira consistiu em avaliar a vida de fadiga ( $N$ ) da camada de rolamento (CBUQ), tanto para amostras com adição de rejuvenescedores ou não, fazendo o uso da diferença de tensão ( $\Delta\sigma$ ) determinada por meio do programa KENLAYER e assim aplicá-la na Equação 3.15. Para determinação da vida de fadiga das misturas estudadas em laboratório. Assim, basicamente foram determinadas as diferenças de tensões nos pontos situados na fibra inferior da camada de rolamento (CBUQ). Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Resultados da retroanálise da vida de fadiga para o caso hipotético analisado

Aditivos	% aditivo	Parâmetros medidos		Vida de fadiga em laboratório			
		$k_2$	$n_2$	P1		P2	
				$\Delta\sigma$ (MPa)	N	$\Delta\sigma$ (MPa)	N
RejuvaSeal	15%	34607	3,39	1,19	2,E+04	0,38	9,E+05
	20%	27242	2,8	1,09	2,E+04	1,31	1,E+04
	25%	17146	2,13	1,02	2,E+04	1,21	1,E+04
AR-5	15%	204266	3,39	1,55	5,E+04	0,34	8,E+06
	20%	79137	2,56	1,52	3,E+04	0,34	1,E+06
	25%	44549	3,01	1,44	1,E+04	0,35	1,E+06
CAP 50/70	15%	161941	2,76	1,47	6,E+04	0,35	3,E+06
	20%	113371	3,18	1,38	4,E+04	0,36	3,E+06
	25%	50301	2,06	1,27	3,E+04	0,37	4,E+05
AR-250	15%	278127	3,21	1,47	8,E+04	0,34	9,E+06
	20%	148878	3,08	1,57	4,E+04	0,34	4,E+06
	25%	103687	2,65	1,43	4,E+04	0,36	2,E+06
AR-500	15%	512099	3,94	1,58	8,E+04	0,33	4,E+07
	20%	291265	3,31	1,48	8,E+04	0,35	1,E+07
	25%	117604	2,48	1,42	5,E+04	0,36	2,E+06
Mistura Nova	N.A.	45589	2,9	1,26	2,E+04	0,33	1,E+06
Fresado Natural	N.A.	24621	0,41	1,13	2,E+04	1,36	2,E+04

Desta análise constatou-se que os valores de vida de fadiga, para as misturas com adição de 15%, 20% ou 25%, apresentaram comportamento semelhante ao que foi determinado em laboratório, mostrado na Figura 4.29, Figura 4.30 e na Figura 4.31, ou seja, as misturas que tiveram maior vida de fadiga foram aquelas cujos ligantes apresentavam maior viscosidade, obedecendo a seguinte ordem: Fresado Natural, RejuvaSeal, AR-5, CAP 50/70, AR-250 e AR-500 e Mistura Nova.

Avaliações com variação da espessura da camada de rolamento para o dobro do valor inicial, mostraram que os valores de vida de fadiga (N) em média são elevados em E+04 vezes para o ponto P1 e E+02 vezes maior para ponto P2, independente do material avaliado.

# CAPÍTULO 5

## *Conclusões*

---

### 5.1 - INTRODUÇÃO

Serão apresentadas neste capítulo as principais conclusões obtidas durante a campanha experimental e avaliação paramétrica dos ligantes e misturas confeccionadas com a adição de agentes rejuvenescedores à base de óleo de xisto e alcatrão. Com base nas conclusões, procura-se sugerir futuros estudos que complementem esta pesquisa.

Inicialmente foram realizadas campanhas de caracterização dos materiais utilizados, como material fresado, rejuvenescedores e ligantes. Em seguida foi estudado um modelo de envelhecimento do ligante asfáltico durante as fases de início de mistura até compactação em campo. Também foi realizada avaliação do efeito selante em misturas asfálticas com agente rejuvenecedor à base de alcatrão frente ao ataque químico de agentes agressores como água e gasolina. Por fim, foram feitas avaliações mecânicas, paramétricas e ambientais das misturas asfálticas rejuvenescidas.

### 5.2 - CONCLUSÕES

De maneira geral, os ligantes rejuvenescidos com 20% de AR-5 forneceram os melhores resultados frente às caracterizações químicas, físicas e reológicas, tanto com base em ensaios tradicionais e quanto os propostos na metodologia Superpave. Este material também apresentou comportamento mecânico compatível com projetos de pavimentação cujo revestimento é do tipo CBUQ.

Com relação aos principais objetivos da pesquisa, foram obtidas conclusões individualmente, descritas a seguir.

*a) Quanto aos materiais utilizados na composição das misturas*

A seleção e caracterização dos materiais seguiram os procedimentos e atenderam, de modo geral, os requisitos mínimos normatizados pelo DNIT e ANP. O CAP 50/70 utilizado atendeu a todas as especificações. Os agregados utilizados para composição das misturas que passaram por processo de selagem e ataque químico também se enquadraram, de modo geral, nos limites preconizados pelas normas técnicas vigentes. Os rejuvenescedores utilizados apresentaram valores compatíveis com as normas utilizadas como referência nas etapas de caracterização dos mesmos.

Em relação ao material fresado, verificou-se que, após extração do ligante residual, este enquadra-se dentro da Faixa “C”, utilizada como padrão de projetos para camada de rolamento do tipo CBUQ, o que permite sua utilização sem que haja a necessidade de recomposição granulométrica. É importante ressaltar que o material fresado é em geral empilhado nos pátios e depósitos do DER e Novacap, sujeito à ação das intempéries, e portanto ter o processo de envelhecimento acelerado.

De posse dos resultados obtidos para o ligante extraído do material fresado foi possível realizar comparações das propriedades físicas e uma análise de periculosidade, sendo estas avaliações em observação as normas estabelecidas.

De acordo com avaliação tradicional, apresentam-se as seguintes conclusões:

- Verificou-se que o processo de extração do ligante usando o equipamento rotarex com o filtro de papel e a destilação no rotavaporador teve um desempenho satisfatório, o que pode ser verificado pela pequena perda de massa do material após o RTFOT, o caracteriza a não contaminação do material extraído com solvente (tricloroetileno);
- Para a realização da mistura de CAP envelhecido com rejuvenescedor verificou-se que a uma temperatura de 135°C e uma velocidade de 1000 rpm foi adequada gerando um material mais homogêneo;
- O ligante asfáltico extraído do material fresado realmente estava envelhecido, uma vez que este material não teve substancial mudança em suas características de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e perda de massa após o envelhecimento RTFOT;

- Observa-se que todas as porcentagens de incorporações de agentes rejuvenescedores ao CAP envelhecido favorecem a diminuição da consistência do ligante envelhecido, conferindo maiores valores de penetração, redução do ponto de amolecimento e, sensível redução do ponto de fulgor e o ponto de combustão, exceto para misturas com RejuvaSeal;

Os ensaios realizados pela metodologia SUPERPAVE indicaram que:

- A perda de massa pelo método RTFOT indicou que os valores permaneceram dentro dos limites estabelecidos, exceto par mistura com RejuvaSeal;
- A maior variação de viscosidade ocorreu no material com adição de RejuvaSeal, que antes do RTFOT apresentava a menor viscosidade dentre todos os materiais e após envelhecimento apresentou a maior viscosidade. Isto se deve ao fato que este material teve a maior perda de frações leves. O material cuja viscosidade melhor se aproximava do comportamento de um CAP 50/70 foi o agente rejuvenescedor AR-5 em todas as porcentagens de adição;
- Todos os ligantes apresentaram valores obtidos de  $G^*/\text{sen}\delta$  compatíveis com a especificação SUPERPAVE. Estes resultados também indicaram que os ligantes com menor viscosidade (mais consistentes) apresentaram os maiores valores de rigidez ( $G^*/\text{sen}\delta$ ), ou seja, são mais resistentes ao acúmulo de deformação permanente.

A avaliação química dos ligantes que foram rejuvenescidos fundamentou as seguintes observações:

- A cromatografia IATROSCAN permitiu separar e quantificar as quatro famílias SARA, onde foi possível verificar qual a quantidade e o rejuvenescedor que levou o ligante envelhecido a comportar-se mais próximo de um CAP 50/70, tomado como padrão;
- As composições que melhor se enquadraram nos padrões estabelecidos pela Shell (2003) foram, respectivamente, a composição com adição de 20% e 25% de AR-5, as quais recompuseram principalmente a fração de aromáticos com redução das resinas e asfaltenos, produzindo um ligante com frações SARA semelhantes ao CAP 50/70. Estes mesmos ligantes foram os que tiveram o melhor Índice de Instabilidade Coloidal ( $I_c$ ), ou seja, possuem os menores valores sendo, portanto, considerados os mais estáveis dentre todas as configurações avaliadas;

- Os espectros de RMN indicaram a adição de 25% de AR-250 como a melhor opção para restabelecer as características químicas do ligante envelhecido, seguido da configuração com 15% e 20% de AR-5. Entretanto, como esta análise considera somente grupos de compostos aromáticos e saturados, a escolha do ligante em função da característica química deve ser realizada com base na cromatografia IATROSCAN, capaz de identificar todas as famílias SARA, ou seja, o melhor material seria aquele com a adição de 20% de AR-5.

#### ***b) Em relação ao modelo de envelhecimento***

A partir do modelo de envelhecimento do CAP, que simula a oxidação e perda de suas propriedades devido à exposição a altas temperaturas e às intempéries, observou-se que a temperatura e o tempo de exposição possuem uma correlação excelente, sendo o modelo capaz de prever o comportamento do ligante durante a fase de usinagem até momento de espalhamento na pista.

A extrapolação realizada a partir do modelo de envelhecimento possibilitou observar que o tempo máximo de exposição é comandado pela penetração que é a primeira característica a atingir o limite máximo pré-estabelecido. Caso o aquecimento não seja realizado com controle restrito da temperatura e tempo, o ligante começa a envelhecer ainda dentro da usina, antes mesmo de ser aplicado em campo. Dessa forma, a curva obtida por meio do estudo do envelhecimento do CAP na estufa RTFOT, pode ser, baseada no fator “temperatura”, uma ferramenta de controle de qualidade desde a fase de usinagem da mistura asfáltica até sua aplicação na pista.

#### ***c) Quanto ao efeito selante do rejuvenescedor à base de alcatrão***

Os resultados dos testes e avaliações estatísticas demonstraram claramente que a combinação água+gasolina apresentou o maior potencial agressor, seguido da gasolina sem combinações, e por fim, do efeito isolado da água. Os corpos-de-prova revestidos com RejuvaSeal sob as mesmas condições, entretanto, apresentaram menor perda de Resistência à Tração ou Módulo de Resiliência do que as amostras correspondentes sem revestimento. Estas observações oferecem evidências conclusivas sobre a eficácia do produto como revestimento protetor contra as ações nocivas dos agentes agressores utilizados na pesquisa.

#### *d) Em relação ao rejuvenescimento de misturas asfálticas*

Os ensaios mecânicos indicaram as seguintes conclusões:

- Todos os aditivos incorporados ao material fresado produziram misturas com propriedade compatíveis para utilização em camadas de rolamento que têm como base a Faixa “C” do DNIT.;
- O acréscimo de aditivo nas misturas fez com que os valores de Resistência à Tração, Estabilidade e Fluência Marshall e Módulo de Resiliência fossem sensivelmente reduzidos em função da maior flexibilidade das misturas, o que é favorável para projetos de pavimentação;
- A vida de fadiga (N), avaliada para todas as misturas apresentaram baixa dispersão, sendo “N” crescente com a quantidade de aditivo até os limites investigados. Os materiais que apresentaram vida de fadiga mais próximas à de uma mistura nova do tipo CBUQ foram o AR-5 e o RejuvaSeal com 15% de adição, seguido da configuração onde foi acrescentado 20% e 25% de AR-5. Aqui fica evidente que a mistura com 20 ou 25%, cujos resultados químicos SARA foram os melhores, também apresentaram os melhores resultados de vida de fadiga.
- Os valores obtidos de energia desprendida durante o processo de ruptura das amostras nos ensaios de resistência à tração e estabilidade Marshall, indicaram que a adição de rejuvenescedores ao fresado fez com que estas apresentassem ruptura mais dúctil.

A avaliação mecanística, utilizando resultados de laboratório fundamentou as conclusões:

- Baseado na teoria elástica de múltiplas camadas, a análise foi realizada por meio do software KENLYAER, onde uma estrutura hipotética de um pavimento com materiais tipicamente utilizados nas vias do Distrito Federal indicaram que todas as misturas rejuvenescidas apresentam comportamento semelhante ao que foi determinado em laboratório, obedecendo a seguinte ordem: RejuvaSeal, Mistura Nova, AR-5, CAP, AR-250, AR-500 e Fresado Natural.

Por meio de ensaios de lixiviação e solubilidade, chamados ensaios de periculosidade, é possível concluir que:

- As misturas asfálticas contendo ou não os rejuvenescedores estudados nesta pesquisa, não apresentam riscos quanto a contaminação do meio ambiente podendo os mesmos ser depositados em aterros sanitários quando não reaproveitados.

### 5.3 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir desta pesquisa, espera-se que outros estudos mais acurados acerca das propriedades físicas, químicas e mecânicas de misturas asfálticas rejuvenescidas para o sucesso das dosagens envolvendo asfaltos reciclados. Assim, sugere-se que mais pesquisas sejam realizadas visando uma melhor compreensão do comportamento de misturas recicladas utilizando agentes rejuvenescedores, contemplando:

- ✓ Avaliação do comportamento de ligantes e misturas rejuvenescidas com uma faixa teores de rejuvenecedor maior do que a utilizada nesta pesquisa;
- ✓ Estudos de dosagem de misturas recicladas utilizando a metodologia SUPERPAVE, a fim de que se obtenha uma mistura final dosada com base em parâmetros volumétricos e de desempenho;
- ✓ Estudos que considerem modelos de caracterização do comportamento viscoelástico de misturas asfálticas recicladas por meio de ensaios de *creep*, obtendo parâmetros de deformações permanentes em função do tempo de carregamento, avaliando a influência do carregamento repetido nas deformações plásticas e viscoplásticas;
- ✓ Realizar comparação de misturas a frio com mistura rejuvenescida com RejuvaSeal por processo à frio e não à quente como realizada nesta pesquisa;
- ✓ Avaliar por meio de ensaios ambientais, amostras seladas com RejuvaSeal;
- ✓ Construção de trechos experimentais com revestimento asfáltico rejuvenescido, para que se tenha maior conhecimento sobre o comportamento da camada reciclada ao longo do tempo, a partir de amostras retiradas *in situ*, medições deflectométricas e monitoramento de defeitos superficiais. Esta avaliação possibilitará também verificar o desempenho da mistura submetida a um carregamento real de tráfego.

# ***Referências Bibliográficas***

---

AASHTO TP5. Método de teste para determinação das propriedades reológicas do Ligante asfáltico utilizando um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.

ANP (2005). Agência Nacional de Petróleo. Resolução ANP N°19, de 11 de julho de 2005.

Agência EFE (2010) disponível em <http://noticias.terra.com.br/>. Acesso em Agosto de 2010.

Araújo, J. L. (2009). Características Funcionais e Mecânicas de Misturas Asfálticas para Revestimento de Pavimentos Aeroportuários. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-177/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 147 p.

ASTM D 4402 (1995). Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. American Society for Testing and Materials.

ASTM D-2872 (1997). Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Materials.

Barra, B.S. (2005). Avaliação do Desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do estado do Pará com emprego do pó calcário. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 177p.

Bayardino, R. A. (2004), A PETROBRAS E O DESAFIO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL Disponível em <http://www.ie.ufrj.br/> Acesso em Agosto de 2010.

Benevides, S. (2000). Análise comparativa dos métodos de dimensionamento dos pavimentos asfálticos – método tradicional do DNER e método de resiliência da COPPE. 2000. 176 f. Dissertação (Mestrado). Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

Bernucci, L., Motta, L., Ceratti, J., & Soares, J. (2006). Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006. 504 f. Incluindo Bibliografia. Patrocínio Petrobrás.

Betunel (2010), Especificação para Agentes Rejuvenescedores a Quente e Emulsionados, disponível em: [www.betunel.com.br](http://www.betunel.com.br) , acessado em 26 de julho de 2010.

Bonfim, V. & Domingues, F. A. A. (1995). Utilização de Fresagem e Reciclagem “In Situ” a Frio. Alternativas na Recuperação de Pavimentos Asfálticos. 29a Reunião Anual de Pavimentação, Volume 3, Cuiabá, MT, p. 602-621

Bonfim, Valmir. (2001). Fresagem de Pavimentos Asfálticos, 2 ed., São Paulo, Fazendo Arte Editorial, 2001.

Brock, J.D. (1996). Boletín Técnico T – 103 S – Oxidación Del Asfalto. Astec Industries, Inc, EUA.

BURR, B.L.; GLOVER, C.J. e BULLIN, J.A., (1993) New Apparatus and Procedure for the Extraction and Recovery of Asphalt Binder from Pavement Mixtures. Transportation Research Record-TRR 1391, National Research Council, Washington. D.C.

Castro, L. N. de. (2003) Reciclagem à Frio "in situ" com Espuma de Asfalto. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE , 171 p.

CCEL (2006). Demonstration of RJSeal. Federal Highway Route No. 2, Shah Alam, Selangor, Malaysia. Crown Capital Enterprise Limited, May 8, 2006 . TS2 Consulting Inc. Lamma, Hong Kong.

CNT (2009). Pesquisa rodoviária 2009: relatório gerencial. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 152 p.

CNT (2010). Boletim econômico, Transporte Atual, Ano XVI, nº 178, Julho de 2010, p 75 Confederação Nacional do Transporte.

Corbett, L.W. (1969). Composition of asphalt based on generic fractionation using solvent deasphalting, elution – adsorption chromatography and densimetric characterization. An. Chem., v.41, p.576.

Dellabianca, L. M. A. (2004). Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-020/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 110p.

DNC (1997). Departamento Nacional de Combustíveis. Portaria DNC nº44 de 29 de setembro de 1997.

DNC (1992). Departamento Nacional de Combustíveis. Portaria DNC nº 01. Especificações do cimento asfáltico de petróleo.

DNER ME 138/94. Misturas betuminosas – determinação da Resistência à Tração por compressão diametral. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio ME 138/94.

DNER ME 163/98. Materiais betuminosos: determinação da ductilidade. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio ME 163/98.

DNER ME 004/94. Materiais betuminosos: determinação da viscosidade “Saybolt-furol” a alta temperatura. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio ME 004/94.

DNER ME 133/94. Misturas betuminosas – determinação do Módulo de Resiliência. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio ME 133/94.

DNER ME 003/99. Material betuminoso: determinação da penetração. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio ME 003/99 .

DNER ME 035/98. Agregados: Determinação da Abrasão Los Angeles. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 035/98.

DNER ME 081/98. Agregados: Determinação da Absorção e da Densidade do Agregado Graúdo. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 081/98.

DNER ME 083/98. Agregados: análise granulométrica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 083/98.

DNER ME 085/94. Material finamente pulverizado: determinação da massa específica real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 085/94.

DNER ME 086/94. Agregado: Determinação do Índice de Forma. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 086/94.

DNER ME 148/94. Material betuminoso: Determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland) .Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 148/94.

DNER ME 193/96. Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos: Determinação da densidade e da massa específica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 193/96.

DNER ME 194/98. Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapmam. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 194/98.

DNIT ES-031/2004. Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Especificação de Serviço ES-031/2004.

DNIT EM 095/2006. Cimentos Asfálticos de Petróleo Especificação de Material. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Especificação de Material EM 095/2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos, Rio de Janeiro, 1998.

EN 12697-43. Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 43: Resistance to fuel.

FAA (2006). Coal-Tar Sealer/Rejuvenator. Engineering Brief N° 44A. Federal Aviation Administration.

Fritzen, M. A.; Motta, L. M.; Oda, S.; Faria, V.; Escudeiro, M. (2008). Comportamento mecânico de algumas misturas asfálticas com dois tipos de asfalto e diferentes teores de ligante, com ênfase na fadiga. Revista Pavimentação , Ano III, N°12. , 29p.- 43p.

Fwa, T. F. (2006) Evaluation of Engineering Benefits of RJSeal Report prepared for Kalvani International Pte Ltd. Departmet of Civil Engineering. National University of Singapore.

Gaestel, C., Shadja, R., Lamminan K.A. (1971). Contribution à la connaissance des propriétés des bitumes routiers. Bull. Laboratoire des Ponts e Chaussées. v.466, p.85-97.

Glita S. (1988). Contribution à l'étude physico-chimie des bitumes. Havre, 1988. Thèse (Doctorat em Sciences) – Faculté des Sciences et Techniques de l'Université du Havre.

Guaitolini, B. S. (2010). Disponível em <http://www.administradores.com.br> Acesso em Agosto de 2010.

Hendriks, C.F; Nijkerk, A.A; vanKoppen, A.E (2007). O ciclo da construção. Tradução, Brasília: Editora Universidade de Brasília. 250p.

Huang, Y. H. (1993). Pavement Analysis and Design. New Jersey, USA: Prentice Hall, 805 p.

IA (2002). Manual do Asfalto. Instituto do Asfalto. Rio de Janeiro, 2002. 599p.

Jennings, P. W.; Pribanic, J. A. (1991). Binder Characterization and Evaluation by Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. Final Report Strategic Highway Research Program SHRP-A-335, p. 150.

Koerner, R.M; Lord, A.E. Jr; Hsuan, Y.H (1992). Arrhenius modeling to predict geosynthetic degradation. Geotextiles and Geomembranes. Vol 11, n°2 pp. 151-183.

Lamontagne, J; Dumas, P; Mouillet, V; Kister, J. (2001). Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) Spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens. Fuel, v.80 p.483-488.

Lamontagne, J. (2002). Viellissement des bitumes modifiés polymères a usage routier par simulations et techniques spectroscopiques. Marseille, 2002. Tese (Doutor em Ciências) –

Faculté des Sciences et Techniques de Marseille Saint-Jérôme – Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III.

Leite, L. F. (1999). Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero. Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Lima, A.T. (2003). Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente. Dissertação de mestrado em Engenharia de Transportes. Programa de Mestrado em Engenharia de em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 99 fl.

Lucena, M. C. C. Caracterização Química e Reológica de Asfaltos Modificados por Polímeros. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, 2005.

Mah, Victor (2006). Concept of P4 – Perpetual Pavement Presentation Process. PRI-Pavement Rejuvenation International. Disponível em [www.rejuvaseal.com](http://www.rejuvaseal.com). Acesso em Março de 2008.

Medina, J.; Motta, L. M. G. (2005). Mecânica dos Pavimentos. 2ª Edição. Rio de Janeiro, RJ.

Mello, L. G. R. (2008). O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas. Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF. 263p.

Merighi, J.V.; Fortes, R.M; Filho, F.V.R.B. (2000). A ABEDA e o Mercado de Asfaltos. Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico. São Paulo-SP, Brasil. 42p.

Morilha Junior, A (2004). Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado. UFSC, Florianópolis, SC, 2004. 165p.

Motta, L. M. G.(1991). Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. 1991. 366 f. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Motta, L.M.G.; Tonial, I.; Leite, L.M. E Constantino, R.S. (1996) Curso sobre Programa SHRP: Aplicação a Ligantes Agregados e Misturas Betuminosas, IBP, Rio de Janeiro. 17p.

NBR 10.004, (1987). Resíduos Sólidos - Classificação. NBR. Associação Brasileira de Normas Técnicas, a. Rio de Janeiro.

NBR 10.005, (1987). Lixiviação de Resíduos. NBR. Associação Brasileira de Normas Técnicas, b. Rio de Janeiro.

NBR 10.006, (1987). Solubilização de Resíduos. NBR. Associação Brasileira de Normas Técnicas, c. Rio de Janeiro.

Oda, S. (2000) Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação. 251 f Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

OEA (2010) Sustentabilidade Ambiental nas Américas, Disponível em <http://www.oas.org/> Acesso em Agosto de 2010.

Peterson, G.D.; Davison, R.R.; Burr, B.L.; Glover, C.J. E Bullin, J.A.(1994) Effect of Composition on Asphalt Recycling Agent Performance. Transportation Research Record 1436, TRB. National Research Council, Washington, D.C.

Pinto, S., (1991). Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.

Ramos, C.R.; Láo, Vânia E. S. T.; (1996). Reciclagem em Usina Gravimétrica no Município do Rio de Janeiro. In: Encontro de Asfalto, 130, pp.001-007, IBP, Rio de Janeiro, 1996.

Rejuvaseal (2010). Composition of "Rejuvaseal". Technical Data. Disponível em [www.rejuvaseal.com.hk](http://www.rejuvaseal.com.hk). Acesso em fevereiro de 2010.

Roberts, F.L.; Kandhal, P.S; Brown, R.E.; Lee, D. E Kenned, Y. T. W.(1996). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA, Maryland, USA.

Rogge, D. F.; Hicks, R. G. (1993). Use of Asphalt Emulsions in-place Recycling: Oregon Experience, In: Transportation Research Record. 23p.

SENÇO, W. De (1997). Manual de técnicas de pavimentação. São Paulo: Ed. Pini, 1997. v.1, 746p.

Shakirullah, M.; Ahmad, I.; Rahman, H.; Khan, M. A.; Ishaq, M.; Shah, A. A (2006). Spectral Analysis of Some Distillates From Asphalt Cracking and Evaluation of UTIMAC as Cracking Catalyst. Journal of the Chinese Chemical Society, vol. 53, p. 1059\_1066, 2006.

Shell, (2003). SHELL Bitumen Handbook. SHELL, Inglaterra.

SHRP (1994) Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE): The Products of the SHRP Asphalt Research Program. Strategic Highway Research Program A-410. National Research Council, Washington, D.C.

Sides, A., Uzan, J., Perl, M. (1985). A Comprehensive Visco-elasto-plastic Characterization of Sand-asphalt under Compression and Tension Cycle Loading. Journal of Testing Evaluation, V.13, N.1, p. 49-59.

Silva, L. S. (2005). Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência na adição de polímeros e comportamento frente a radiação UV. Tese de Doutorado em Engenharia. UFRGS, Porto Alegre, 2005, 155p.

Silva, L. S.; Forte, M. M. C. (2005) Envelhecimento UV de Ligantes Asfálticos, Revista Transportes, Vol. XII, nº2, p. 5-20, Dezembro de 2005.

Silva, J.P.S.; Farias, M. M.; Jiménez, A. M. G. (2010). Avaliação do Efeito Selante de Agente Rejuvenescedor em Misturas Asfálticas, 20º Encontro de Asfalto, IBP Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, Maio de 2010.

Souza, M.V.R (2010). Efeitos de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Programa de Pós-graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília. Brasília Universidade de Brasília, 147f.

Tuchumantel, Jr. Osvaldo (2004), Avaliação Estrutural de Trecho Experimental Urbano de Pavimento Asfáltico Reciclado a Frio, 35ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio De Janeiro– RJ – Brasil.

TRB (2002). Simple Performance Test for Superpave Transportation Research Board. Mix Design. NCHRP report 465.

Vale, S.F.C. & Stemler, Y. T S.V. (2011). Avaliação dos Efeitos de Produtos Rejuvenescedores em Ligantes Asfálticos Envelhecidos. Monografia de Projeto Final. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 84 p.

Vasconcelos, K.L; Soares, J.B. (2004). Influência do percentual de fresado e do envelhecimento de curto prazo na dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente. ANPET XVIII. Florianópolis, SC.

Whiteoak, D., (1990). SHELL Bitumen Handbook. SHELL, Inglaterra.

Wirtgen, 2011 – site <http://www.wirtgen.de/>