

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

**EFEITO DA ADIÇÃO DE FÍLER GESSO NAS
PROPRIEDADES DOS LIGANTES ASFÁLTICOS E
CONCRETOS ASFÁLTICOS**

FERNANDA PEREIRA GOUVEIA

ORIENTADOR: PROF. LUCIANO MENDES BEZERRA

CO-ORIENTADOR: PROF. MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E

CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.TD - 003 A/13

BRASÍLIA/DF: 19 DE ABRIL – 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE FÍLER GESSO NAS
PROPRIEDADES DOS LIGANTES ASFÁLTICOS E CONCRETOS
ASFÁLTICOS**

FERNANDA PEREIRA GOUVEIA

TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (UnB) (Orientador)

Prof. Márcio Muniz de Farias, PhD (UnB) (Co-orientador)

Prof. Antônio Alberto Nepomuceno, Dr. Ing. (UnB) (Examinador Interno)

Prof. William Taylor Matias Silva, Dr. Ing. (UnB) (Examinador Interno)

Prof. Newton Moreira de Souza, DSc. (UnB) (Examinador Externo)

Prof. Erinaldo Hilário Cavalcante, DSc. (UFS) (Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 19 DE ABRIL DE 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

GOUVEIA, FERNANDA PEREIRA

Efeito da Adição de Fíler Gesso nas Propriedades dos Ligantes Asfálticos e Concretos Asfálticos [Distrito Federal] 2013.

xxiii,159 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutora, Estruturas e Construção Civil, 2013). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Asfalto modificado

2. Concreto Asfáltico com adição

3. Fíler gesso

4. Resíduos de chapas de gesso acartonado

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GOUVEIA, F. P. (2013). Efeito da Adição de Fíler Gesso nas Propriedades dos Ligantes Asfálticos e Concretos Asfálticos. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD - 003 A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Fernanda Pereira Gouveia.

TÍTULO: Efeito da Adição de Fíler Gesso nas Propriedades dos Ligantes Asfálticos e Concretos Asfálticos.

GRAU: Doutora

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília 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 dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Fernanda Pereira Gouveia
Tv. Tavares Bastos nº 836, Marambaia
66.615-005 Belém – PA – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, o qual esteve sempre ao meu lado me amparando, nos dia e noites de solidão no laboratório, distante da família e de minha cidade natal. Ele que nunca me abandonou e conduziu os meus caminhos, emanando forças para que eu sempre continuasse...

À minha mãe Maria Goreth Bendelack, a quem sou grata por toda a minha formação e princípios, peças fundamentais que trago comigo e pude compartilhar com amigos e professores que convivi... Obrigada pelo total apoio, pois a senhora sempre me deu forças para lutar nas mais difíceis batalhas, me levantou nas derrotas e vibrou com as minhas vitórias. À você dedico esta minha grande vitória!

Ao Prof. Luciano Mendes Bezerra por ter se disposto a orientar esta tese, de certa forma desafiadora pela área distinta a de sua atuação, estando sempre disponível para as reuniões de trabalho, encaminhando, discutindo e apoiando todos os meus passos. À você minha admiração e meus sinceros agradecimentos.

Ao curso de pós graduação em Geotecnia, representado pelo Prof. Márcio Muniz de Farias que, gentilmente abriu as portas do Laboratório (LER) e de fato, possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa. Sempre disponível a tirar dúvidas, compartilhando de seus preciosos conhecimentos, de forma amistosa. Obrigada pelo apoio técnico!

Aos amigos, que considero verdadeiros irmãos, Elisandra Medeiros e Fábio Andrade que sempre estiveram ao meu lado, nas situações de alegria e descontração, mas também, nas dificuldades. Sem a amizade deles, seria impossível finalizar esta jornada. Obrigada pelo carinho, consideração e companheirismo.

Agradeço aos colegas João Paulo, Marcus Vinícius, Janaína e Ferney, alunos de doutorado do curso de Geotecnia, os quais generosamente compartilharam de seus conhecimentos adquiridos na área de pavimentação, e por muitas vezes se dispuseram em ajudar nas realizações de ensaios, contribuindo para o efetivo desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos demais que não foram citados, porém lembrados neste sublime momento.

DEDICATÓRIA

*Dedico cada linha desta tese à minha
querida mãe Goreth Bendelack e
minha irmã Renata Gouveia, que
mesmo distantes sempre me
apoiaram e vibravam por cada
degrau galgado....
Esta é uma conquista muito
importante para nós....*

RESUMO

Esta pesquisa propõe o aproveitamento de resíduos de chapas de gesso acartonado (CGA), componentes do sistema de construção *drywall*. A utilização do *drywall* vem ganhando espaço, atualmente, no mercado brasileiro, devido ao aquecimento da indústria da construção, impulsionado pelos créditos imobiliários. Os resíduos de CGA podem ser gerados tanto na etapa de fabricação, quanto na etapa de construção, e sua deposição em aterros sanitários propicia o aparecimento de gás sulfídrico (H_2S) que é inflamável e traz danos à saúde humana. Por outro lado, na área de pavimentação, estudos demonstram que a adição de fíleres em ligantes asfálticos e misturas asfálticas modifica as suas características promovendo benefícios importantes para os revestimentos asfálticos. Neste trabalho, o gesso oriundo das CGA foi transformado em fíler e adicionado ao cimento asfáltico de petróleo (CAP) nos seguintes percentuais, em massa: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Também foram produzidas misturas do tipo concreto asfáltico (CA) utilizando fíler gesso, em substituição ao fíler convencional de uma mistura de referência, nos percentuais em massa, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. A dosagem da mistura asfáltica foi baseada no método *Marshall*, de acordo com os limites da faixa granulométrica “C” do DNIT. Destacam-se como resultados dos ensaios para o CAP modificado com gesso, o aumento da viscosidade, a diminuição da penetração e aumento do ponto de amolecimento, além da redução da suscetibilidade térmica. Essas características são positivas, no ponto de vista da melhoria do desempenho dos pavimentos, pois proporcionam o aumento da resistência à fadiga e à deformação permanente a que são submetidos. O ensaio de cisalhamento dinâmico (DSR) indicou que os CAPs modificados, a partir de 40%, apresentaram comportamento dúctil e ao mesmo tempo elástico, contribuindo com a resistência à fadiga dos concretos asfálticos. A adesividade do agregado-CAP modificado ficou prejudicada nas composições contendo 60%, 80% e 100 % de gesso. Os ensaios mecânicos em corpos de prova de CA, indicaram que 60%, 80% e 100% de gesso em substituição ao fíler convencional, promovem melhorias consideráveis para a vida de fadiga e deformações permanentes, além do aumento da resistência à tração e módulo de resiliência. Por outro lado, ensaios de umidade induzida apontaram que corpos de prova contendo adição de fíler gesso, acima de 20% foram os que mais sofreram suscetibilidade. Conclui-se que, devido às limitações frente às condições de umidade, o fíler gesso pode ser utilizado em concretos asfálticos, prevendo até 20% de substituição ao fíler convencional.

ABSTRACT

This research proposes the reuse of drywall plasterboard waste. The use of PlasterBoard (PB or CGA in portuguese) in Brazil has increased in recent years due to the growing of the building industry, driven by the easiness of real state credits. PB Waste (PBW) can be generated both during its own manufacturing stage or as scraps in the construction sites. The deposition of PBWs in landfills allows the undesirable production of hydrogen sulfide (H₂S) gas. Such gas is flammable and brings harm to human health. On the other hand, in matters of paving, studies show that the addition of asphalt binders and fillers in asphalt mixtures change the paving characteristics producing major benefits in asphaltic coatings. In this research, the gypsum of the PBWs is transformed into filler and added to the Petroleum Asphalt Cement (PAC or CAP in portuguese) in the following percentages, in weight: 20%, 40%, 60%, 80% and 100%. Also mixtures of Asphalt Concrete (AC or CA in portuguese) were produced using gypsum as filler, replacing the conventional fillers of standard reference mixtures in weight percentage of 20%, 40%, 60%, 80% and 100%. The dosage of the asphalt mix was based on the Marshall method according to the limits of the range of particle size "C" of the Brazilian Department of National Infrastructure and Transportation (DNIT). The results of the tests for the modified PAC, draw attention to the increase in viscosity, decrease in penetration, increase in the softening point, and reduction in the thermal susceptibility. These results are positive to improving paving performances, as they provide more strength to fatigue and to permanent deformation. The Dynamic Shear Rehometer Test (DSR) indicated that the modified PACs (with 40% or more of filler from PBWs) showed elastic and ductile behavior giving to AC a better fatigue strength. The adhesion among aggregates and modified PAC was worse for compositions with 60%, 80% and 100% of PBWs. The mechanical tests on modified PAC specimens, indicated that 60%, 80% and 100% of gypsum, replacing the conventional fillers, provided significant improvements to fatigue and permanent deformation strengths, and increased tensile strength and modulus of resilience. However, specimens with more than 20% of gypsium and under induced moisture showed a decrease in tensile strength. In conclusion, because of such limitation due to moisture, gypsum replacing the conventional filler, may be used in AC up to 20%.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	1
1.2 OBJETIVO GERAL.....	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4 ESTRUTURA DA TESE	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 CONCRETO BETUMINOSO USINADO À QUENTE	6
2.1.1 Materiais constituintes do concreto asfáltico.....	7
2.1.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	7
2.1.1.2 Agregados.....	9
2.1.1.3 Fíler (material de enchimento).....	11
2.1.2 Ligantes modificados e misturas asfálticas com adições: Pesquisas realizadas	13
2.2 CHAPAS DE GESSO ACARTONADO (CGA)	19
2.2.1 Processo de produção e composição das CGA.....	19
2.2.2 Consumo e geração dos resíduos de CGA	22
2.2.3 Reciclagem das CGA.....	27
2.2.4 Legislação Ambiental Brasileira	33
3.1 MATERIAIS	36
3.1.1 Gesso (fíler).....	36
3.1.2 Agregados.....	39
3.1.3 Ligante asfáltico (CAP 50/70).....	39
3.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	42
3.2.1 Ensaio para a determinação das propriedades dos agregados e fíler.....	42
3.2.1.1 Análise granulométrica dos agregados e do gesso (DNER-ME 083/98).....	43
3.2.1.2 Determinação da massa específica e absorção dos agregados	44
3.2.1.3 Ensaio de Equivalente de areia (DNER-ME 054/97).....	48

3.2.1.4	<i>Determinação do desgaste à abrasão (DNER-ME 035/98)</i>	49
3.2.1.5	<i>Determinação do índice de forma (DNER-ME 086 /94)</i>	50
3.2.1.6	<i>Avaliação da durabilidade dos agregados pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio (DNER-ME 089/94)</i>	52
3.2.1.7	<i>Adesividade do agregado graúdo ao ligante (DNER- ME 078/94)</i>	53
3.2.1.8	<i>Análise mineralógica dos agregados</i>	54
3.2.1.9	<i>Análises química e mineralógica do gesso</i>	55
3.2.1.10	<i>Análises Térmicas - Análise Termodiferencial (TD) e Análise Termogramétrica (ATG) do fíler gesso</i>	56
3.2.1.11	<i>Análise microscópica do fíler gesso</i>	56
3.2.1.12	<i>Determinação da carga superficial do fíler gesso</i>	57
3.2.1.13	<i>Determinação da expansão do fíler gesso</i>	59
3.2.2	<i>Ensaio para determinação das propriedades físicas dos ligantes</i>	60
3.2.2.1	<i>Determinação da penetração (ABNT NBR 6576:2007)</i>	61
3.2.2.2	<i>Ensaio de ponto de amolecimento - Método do anel e bola (ABNT NBR 6560:2008)</i>	61
3.2.2.3	<i>Índice de Suscetibilidade Térmica (IST)</i>	63
3.2.2.4	<i>Ponto de fulgor e Ponto de combustão (ABNT NBR 11341:2008)</i>	63
3.2.2.5	<i>Determinação da Ductilidade (ABNT NBR 6293:2001)</i>	64
3.2.2.6	<i>Densidade relativa do ligante (ABNT NBR 6296:2004)</i>	65
3.2.2.7	<i>Viscosidade Absoluta (ASTM D 4402:2002)</i>	66
3.2.2.8	<i>Ensaio de Cisalhamento Dinâmico (DSR)</i>	68
3.2.2.9	<i>Determinação do efeito do calor e do ar de uma película delgada rotacional (Ensaio de envelhecimento) (ABNT NBR 15235:2009)</i>	72
4. DOSAGEM E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS		74
4.1	<i>Dosagem das misturas segundo o método Marshall (DNER-ME 043/95)</i>	74
4.1.1	<i>Parâmetros utilizados na definição do teor ótimo de ligante asfáltico</i>	77

4.1.1.1 <i>Massa específica aparente (da), massa específica máxima teórica (DMT) e massa específica máxima medida (Gmm)</i>	77
4.1.1.2 <i>Parâmetros volumétricos</i>	78
4.1.2 <i>Moldagem dos corpos-de-prova (CPs)</i>	80
4.1.3 <i>Determinação do teor de projeto (TP) do ligante asfáltico para a mistura de referencia.</i>	84
4.1.4 <i>Dosagem das misturas com adição de gesso e mistura de referência</i>	87
4.1.4.1 <i>Temperaturas de trabalho</i>	87
4.1.4.2. <i>Parâmetros volumétricos de dosagem Marshall para as misturas com adição de gesso.</i>	89
4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS	91
4.2.1 <i>Ensaio de resistência à tração por compressão diametral</i>	92
4.2.2 <i>Ensaio de módulo de resiliência</i>	93
4.2.3 <i>Ensaio de Vida de Fadiga por compressão diametral</i>	95
4.2.4 <i>Deformação permanente por compressão uniaxial sob carga estática (Creep estático)</i>	99
4.2.5 <i>Dano por umidade induzida</i>	100
4.2.6 <i>Ensaio Cantabro</i>	102
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	104
5.1 RESULTADOS E ANÁLISES DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E FÍLER	104
5.1.1 <i>Análise granulométrica</i>	104
5.1.2 <i>Densidade e Absorção dos materiais</i>	105
5.1.3 <i>Ensaio de equivalente de areia</i>	106
5.1.4 <i>Ensaio de Abrasão Los Angeles</i>	106
5.1.5 <i>Índice de Forma (f)</i>	107
5.1.6 <i>Avaliação da durabilidade dos agregados pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio</i>	107

5.1.7 Adesividade do agregado ao ligante asfáltico	108
5.1.8 Análise mineralógica dos agregados	110
5.1.9 Análise Química e Mineralógica do gesso	112
5.1.10 Análise Térmica Diferencial (ATD) e Gravimétrica (TG) do gesso	113
5.1.11 Determinação da carga elétrica do fíler gesso	114
5.1.12 Determinação da expansibilidade do fíler gesso	116
5.2.1 Ensaios de penetração e Ponto de Amolecimento	118
5.2.2 Ensaio de Viscosidade	119
5.2.3 Ensaio de DSR.....	122
5.2.4 Efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional (RTFOT)	124
5.2.4.1 <i>Variação de massa</i>	125
5.2.4.2 <i>Penetração , Aumento do ponto de amolecimento e Penetração retida</i>	126
5.2.4.3 <i>Índice de suscetibilidade térmica (IST)</i>	128
5.2.5 Ensaio de ductilidade.....	130
5.2.6 Ensaio de densidade.....	131
5.2.7 Ensaio de Ponto de fulgor (PF) e Ponto de combustão (PC).....	132
5.3 Resultados e ANÁLISES da caracterização MECÂNICA DAS MISTURAS	133
5.3.1 Resistência à Tração e Módulo de Resiliência	133
5.3.2 Vida de Fadiga.....	136
5.3.3 Deformação permanente (<i>Creep</i> estático)	137
5.3.4 Dano por umidade induzida.....	139
5.3.5 Ensaio Cantabro.....	142
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..	144
6.1 Considerações Finais	144
6.1.1 Estudo dos agregados e do fíler gesso	144
6.1.2 Estudo dos ligantes modificados	145
6.1.3 Estudo do comportamento mecânico das misturas asfálticas	147

6.2 Sugestões para trabalhos futuros149

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS151

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de corpo de prova de concreto asfáltico.	6
Figura 2.2 – Aspecto da viscosidade do CAP quando aquecido.	7
Figura 2.3 – Resíduo de EVA em forma de aparas e em pó oriundos do processo de produção de calçados (ALENCAR, 2005).	16
Figura 2.5 – Aspecto do resíduo de gesso coletado na obra (à esquerda); resíduo de gesso após peneiramento em malha # 200 (FREITAS, 2010).	18
Figura 2.6 – Divisórias e forros de CGA (Sistema <i>drywall</i>).	19
Figura 2.7 – Etapas do processo de produção das CGA (GEROLA, 2012).	20
Figura 2.8 - Evolução anual do consumo de chapas <i>drywall</i> no Brasil (mil m ²) (Dados adaptados da ASSOCIAÇÃO DRYWALL, 2011).	22
Figura 2.9 – Consumo de CGA na cidade de Brasília – DF no período de 2000 a 2009, em mil m ² (Dados adaptados da ASSOCIAÇÃO DRYWALL, 2010).	23
Figura 2.10 – Consumo de CGA por região no período de 2004 a 2010, em m ² (Dados adaptados da ASSOCIAÇÃO DRYWALL, 2011).	23
Figura 2.11 – Consumo mundial de CGA (m ² por habitante /ano) (Dados adaptados da ASSOCIAÇÃO DRYWALL, 2011).	24
Figura 2.12 – Resíduos de CGA dispostos no pátio de uma fábrica, resultantes do processo de produção.	25
Figura 2.13 - Fontes de resíduos de gesso obtidos na etapa de construção na RMSP (Adaptado de JOHN, 2003b).	25
Figura 2.14 – Fluxo de resíduos de CGA na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (Adaptado de MARCONDES, 2007).	26
Figura 2.15 - Unidade móvel de reciclagem de resíduos do gesso (HENRIK, 2007).	28
Figura 2.16 – Distribuição de resíduos de <i>drywall</i> gerados nos EUA (Adaptado de MARVIN, 2000).	30
Figura 2.17 –Exemplo de compostagem (à esquerda); pilha de compostagem onde pedaços de gesso (manchas brancas) podem ser observados (TOWNSEND <i>et al.</i> , 2001).	31
Figura 2.18 – Tratamento do solo com gesso reciclado de CGA para plantio de repolho, alface, couve (à esquerda); mudas plantadas no solo tratado com o gesso (TOWNSEND <i>et al.</i> , 2001).	31
Figura 3.1 – Resíduos de chapa de gesso acartonado.	36

Figura 3.2 - Processo de separação do gesso.....	37
Figura 3.3 – Fardos de papel oriundos das CGA prontos para ser utilizados (<i>Drywall Recycling Services Inc</i> , 2013).....	38
Figura 3.4 – Processo de obtenção do fíler gesso.....	38
Figura 3.5 – Agregados utilizados na pesquisa.	39
Figura 3.6 – Acondicionamento dos ligantes em latas.	41
Figura 3.7 – Processo de mistura do gesso ao CAP.....	42
Figura 3.8 – Fluxograma de ensaios realizados na etapa de caracterização dos agregados e fíler gesso.....	43
Figura 3.9 – Agitador de peneiras mecânico (à esquerda) e granulômetro a <i>laser</i>	44
Figura 3.10 – Sequência de procedimentos para o ensaio de determinação das massas específica real e aparente e absorção do agregado graúdo.	45
Figura 3.11– Frasco <i>Chapman</i> contendo o agregado miúdo.....	46
Figura 3.12 – Sequência de procedimentos para a determinação da massa específica real dos fíleres gesso e calcário.	48
Figura 3.13 – Sequência de procedimentos para o ensaio que determina o equivalente de areia do agregado miúdo.....	49
Figura 3.14 – Material após ensaio de abrasão, redução da massa de amostra retida na peneira n ^o .12 e posterior lavagem para a determinação da massa após o abrasão.	50
Figura 3.15 – Crivo de abertura circular utilizado para seleção das frações do material (esquerda) e crivo redutor.....	52
Figura 3.16 – Frações do agregado imersas na solução de sulfato de magnésio; vista de cima do agregado imerso na solução.....	53
Figura 3.17– Mistura do CAP ao agregado e amostras imersas e água destilada para posterior permanência em estufa.	54
Figura 3.18 – Analisador térmico RB 3000.....	56
Figura 3.19 – Observação de uma amostra de gesso com o auxílio de microscópio digital, onde é percebida a presença de fibras de vidro.....	57
Figura 3.20 – Composição do esqueleto sólido do corpo de prova de CA.....	58
Figura 3.21 – Titulador utilizado para o ensaio de determinação de carga superficial do gesso e amostras em repouso.....	59
Figura 3.22 – Esquema de ensaio para determinação da variação longitudinal da amostra de gesso.	60

Figura 3.23 – Fluxograma dos ensaios para a determinação das propriedades dos ligantes.....	60
Figura 3.24 – Equipamento utilizado no ensaio de penetração. Detalhe da agulha ao penetrar a amostra.....	61
Figura 3.25 – Exemplo de anéis moldados para a determinação do PA.	62
Figura 3.26 – Primeiros instantes do ensaio (à esquerda) e término do ensaio onde é observado que as esferas tocam a placa de referência.....	62
Figura 3.27 – Ensaio em andamento para determinação do PF e PC e recipiente padrão utilizado para o ensaio.	64
Figura 3.28 – Etapas do ensaio para a determinação da ductilidade do ligante asfáltico.	65
Figura 3.29 – Etapas do ensaio para a detrminação das massas: (1) do picnômetro vazio; (2) do picnômetro cheio de água destilada; (3) do picnômetro com $\frac{3}{4}$ do volume preenchido por ligante e (4) do picnometro contendo ligante mais água.....	66
Figura 3.30 – Esquema do funcionamento do aparelho Brookfield (BERNUCCI et al., 2006).....	67
Figura 3.31 – Aparelho Brookfield e detalhe do <i>spindle</i>	68
n°21 preso na haste do aparelho.	68
Figura 3.32 – Esquema de ensaio (SILVA, 2011).....	69
Figura 3.33 – Representação esquemática do fenômeno de cargas cíclicas.....	70
obtidas no DSR (LEITE, 1999).	70
Figura 3.34 – Variação do ângulo de fase com o tipo de ligante asfáltico e relação entre G^* , G' , G'' e ângulo de fase (LIMA, 2008).....	71
Figura 3.35 – Pesagem dos ligantes no frasco padrão de ensaio para o ensaio RTFOT. 72	
Figura 3.36 – Frascos dentro da estufa de envelhecimento (acima) e aspecto final do frasco após o ensaio.....	73
Figura 4.1 – Fluxograma contendo as etapas para a produção das misturas e ensaios para a determinação das propriedades mecânicas.	74
Figura 4.2 – Gráfico da composição granulométrica da mistura CA-0 enquadrada nos limites da Faixa C do DNIT.	76
Figura 4.3 - Esquema da volumetria de uma mistura asfáltica (BERNUCCI et al., 2006).	79
Figura 4.4 - Curva viscosidade versus temperatura definida para o ligante asfáltico. ...	81
Figura 4.5 – Eatapas do processo de dosagem <i>Marshall</i>	82

Figura 4.6 - Corpos de prova submersos em banho- maria e equipamento utilizado no ensaio de estabilidade e fluência tendo como detalhe o CP inserido no molde de compressão.	83
Figura 4.7 – Curvas dos parâmetros determinadas na dosagem Marshall para a mistura de referência (CA-0).	84
Figura 4.8 – Representação esquemática dos grupos de corpo de prova.	85
Figura 4.9 – Gráfico traçado para a determinação do teor ótimo de ligante para a mistura de referência contendo os valores limites para Vv e RBV, conforme DNIT 031/2006-ES.	86
Figura 4.10 – Composições das misturas de referência e com adição de fíler gesso para produção de CPs.	88
Figura 4.11 – Corpos de prova de CA produzidos, de acordo com as suas respectivas composições.	88
Figura 4.12 – Resultados dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall para todos os teores.	91
Figura 4.13 Apresentação das tensões no centro da amostra do corpo de prova; esquema de compressão diametral do corpo de prova (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006; DNER - ME 138/94).	92
Figura 4.14 – Equipamento para ensaio de resistência à tração por compressão diametral e o detalhe do dispositivo centralizador.	93
Figura 4.15 – Visão geral do equipamento para ensaio de módulo de resiliência (à esquerda); molde de ensaio e detalhe dos LVDT's conectados ao molde.	94
Figura 4.16 – Tela de ensaio de MR finalizado.	95
Figura 4.17 – Equipamento utilizado para ensaio de vida à fadiga (à esquerda); CP rompido após conclusão do ensaio.	97
Figura 4.18 – Tela de ensaio de fadiga finalizado, indicando a tensão de ruptura e o número de ciclos totais.	97
Figura 4.19 – Tela de ensaio <i>Creep</i> estático finalizado.	99
Figura 4.20 – Detalhe dos CP com as faces capeadas e LVDTs posicionados na placa de carregamento (à esquerda); visão geral do equipamento para o ensaio de <i>creep</i> estático.	100
Figura 4.21 – Sequência de procedimentos do ensaio de umidade induzida.	102
Figura 4.22 – Determinação da massa inicial; processo de desgaste no equipamento <i>Los Angeles</i> e determinação da massa final, após o ensaio.	103

Figura 5.1 – Distribuição da granulometria dos agregados a serem utilizados nas misturas asfálticas.....	105
Figura 5.2 – Distribuição da granulometria do gesso (fíler).....	105
Figura 5.3 – Aspecto dos agregados após o ensaio de durabilidade.....	107
Figura 5.4 - Aspecto dos agregados após o ensaio de adesividade	109
Figura 5.5 - Aspecto dos agregados com a película de ligante deslocada após o ensaio de adesividade.....	109
Figura 5.6 - Aspecto das misturas agregados-ligante após permanência em estufa à 40°C, durante 72 h.	110
Figura 5.7 – Difratoograma para as amostras de brita zero e brita 1.....	111
Figura 5.8 – Difratoograma para a amostra de pó de brita	111
Figura 5.9 - Difratoograma para amostra de gesso.....	113
Figura 5.10 – Gráfico das análises térmica diferencial e termogravimétrica do gesso.	114
Figura 5.11 – Gráfico carga líquida versus pH de amostras de gesso.	115
Figura 5.12 – Resultados dos ensaios de penetração.....	118
Figura 5.13 - Resultados dos ensaios de ponto de amolecimento.	118
Figura 5.14 – Efeito do fíler gesso na viscosidade dos ligantes, nas temperaturas 135 °C, 150 °C e 177°C.	119
Figura 5.15 – Aspecto da viscosidade do CAP 100% à temperatura de 135°C.	120
Figura 5.16 – Curvas viscosidade <i>versus</i> temperatura definidas para os ligantes natural e modificados.	121
Figura 5.17 – Módulo complexo (G*) em função da temperatura dos ligantes.	122
Figura 5.18 – Módulo complexo G*/sen δ em função da temperatura dos ligantes. ...	123
Figura 5.19 – Ângulo de fase (δ) em função da temperatura dos ligantes.	124
Figura 5.20 – Resultados da variação de massa após ensaio de envelhecimento das amostras (RTFOT).....	125
Figura 5.21 – Variação dos resultados dos ensaios de penetração, antes a após RTFOT.	126
Figura 5.22 - Valores do ensaio de ponto de amolecimento, antes e após RTFOT. ...	126
Figura 5.23 – Resultados do ensaio de ponto de amolecimento após envelhecimento das amostras (RTOFT).....	127
Figura 5.24 – Valores para a penetração retida após RTFOT.	128
Figura 5.25 – Resultados dos ensaios de viscosidade <i>Brookfield</i> (Log-log Viscosidade <i>versus</i> Log Temperatura).....	129

Figura 5.26 – Resultados do ensaio de ductilidade antes e após o processo de envelhecimento (RTFOT) das amostras.	131
Figura 5.27– Resultados do ensaio de densidade relativa para todo os ligantes (método do picnômetro).....	132
Figura 5.28 – Resultados dos ensaios de PF e PC para os teores estudados.	132
Figura 5.29 - Resultados dos ensaios de RT para as mituras.	134
Figura 5.30 - Resultados dos ensaios de MR para as mituras.	134
Figura 5.31 – Valores de RT, MR e MR/RT em função das misturas estudadas.....	135
Figura 5.32 – Gráfico contendo os resultados dos ensaios de vida à fadiga em função das misturas.	136
Figura 5.33 – Gráfico contendo as curvas do ensaio de creep estático para as misturas.	138
Figura 5.34 – Valores de RRT determinados para as misturas.	140
Figura 5.35 – Resultados das RT e RTu para as composições de CA.....	140
Figura 5.36 - Aspectos do corpo de prova CA-100 após o ensaio de dano por umidade.	141
Figura 5.37 – Resultados do ensaio Cantabro para as misturas asfálticas.....	142
Figura 5.38 – Aspecto das misturas após o ensaio Cantabro.	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Granulometria requerida para os fíleres, segundo DNIT 031/2006 ES.....	11
Tabela 2.2 – Composição granulométrica do C de acordo com as faixas granulométricas A, B e C estabelecidas pela norma do DNIT 031/2006-ES.....	13
Tabela 2.3 – Composição das CGA utilizadas nesta pesquisa, segundo informações do fabricante.	21
Tabela 2.4 – Tipos de CGA segundo a NBR 14715.....	22
Tabela 2.5 – Classificação dos resíduos de construção e suas respectivas destinações conforme resolução CONAMA nº307/2002.	34
Tabela 3.1 - Especificação dos limites das características requeridas para o CAP 50/70, conforme ANP (2005) e valores determinados em laboratório, para o CAP natural.	40
Tabela 3.2 – Composições de ligantes asfálticos utilizados na pesquisa.	41
Tabela 3.3 – Determinação da graduação do material após análise granulométrica, segundo DNER-ME 086/94.	51
Tabela 4.1 - Composição granulométrica do CA conforme faixas granulométricas A, B e C estabelecidas pela norma do DNIT 031/2006-ES. Em destaque a “faixa C” que será utilizada nesta pesquisa.	75
Tabela 4.2 – Distribuição granulométrica da mistura CA-0 definidas por meio da planilha eletrônica do programa <i>Microsoft Office Excel</i>	76
Tabela 4.3 – Valores limites para as características requeridas para concreto asfáltico em camadas de rolamento, segundo a DNIT 031/2006-ES.....	77
Tabela 4.4 – Variação de temperaturas de trabalho do ligante, observados os limites normativos.	81
Tabela 4.5 - Valores limites das características especificadas para concreto asfáltico segundo DNIT 031/2006-ES.	85
Tabela 4.6 - Parâmetros volumétricos determinados na dosagem Marshall para a mistura de referência (CA-0).	86
Tabela 4.7 – Variação das temperaturas de trabalho dos ligantes modificados, observados os limites normativos para a viscosidade do ligante natural.	89
Tabela 4.8 - Parâmetros volumétricos determinados na dosagem Marshall para as misturas com fíler gesso e mistura de referência.	90
Tabela 5.1 – Valores para a densidade e absorção.	106

Tabela 5.2 – Resultados dos elementos obtidos na amostra de gesso.	112
Tabela 5.3 - Valores das dimensões da amostra, antes e após o ensaio.	116
Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios físicos para CAPs modificados e especificações requeridas para o do CAP natural, segundo ANP.	117
Tabela 5.5 - Resultados para o IST antes e após processo de envelhecimento.	129
Tabela 5.6 – Ângulo formado entre as retas e o eixo X para cada ligante.	130
Tabela 5.7 - Valores dos coeficientes K_1 , n_1 e do coeficiente de determinação R^2	136
Tabela 5.8 – Valores médios para as deformações máximas e recuperação elástica relativa das misturas.	138

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAGESSO	Associação Brasileira de Gesso
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Termogravimétrica
ATT	Área de Transbordo e Triagem para resíduos da construção civil
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento asfáltico de Petróleo
CAPs	Cimentos asfálticos de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CEFTRU	Centro Interdisciplinar de Estudos em Transportes
CGA	chapas de gesso acartonado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
cP	<i>centipoise</i>
CP	corpo de prova
CPA	camada porosa de atrito
DMT	Densidade máxima teórica da mistura asfáltica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DR-X	Difração de raios -X
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
EUA	Estados Unidos da América
EVA	Copolímero estileno-acetato de vinila
GRI	<i>Gypsum Recycling International</i>
H ₂ S	ácido sulfídrico
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
LER	Laboratório de Engenharia Rodoviária
NBR	Norma brasileira

NWGR	<i>New West Gypsum Recycling</i>
PGRS	Plano de Gestão de Resíduos Sólidos
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RMSP.	Região Metropolitana de São Paulo
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
SBR	Copolímero estireno-butadieno
SBS	Copolímero de estireno-butadieno-estireno
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SINDUGESSO	Sindicato da Indústria do Gesso
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	centímetro
cm ³	centímetro cúbico
m	massa seca
m _a	massa imersa em água
m _s	massa saturada com superfície seca
G _{sa}	massa específica real
G _{sb}	massa específica aparente
cP	<i>centipoise</i>
cSt	centistoke
E	módulo de Elasticidade
G*	módulo complexo
G'	módulo elástico
G''	módulo viscoso
g	gramas
da	densidade aparente
Hz	hertz
Kgf/cm ²	quilograma força por centímetro quadrado
Km	quilômetro
kN	quilonewtons
kPa	quilo Pascal
MPa	mega pascal
N	newton
°C	grau Celsius
°R	grau Rankine
Pa.s	pascal-segundo
rpm	rotações por minuto
s	segundos
t	tonelada
V _v	volume de vazios
µm	micrômetro
σ	tensão

#	peneira
%	porcentagem
δ	ângulo de fase em ligantes asfálticos
ρ	massa específica real

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Atualmente, muitas pesquisas têm sido realizadas no meio acadêmico com o objetivo de viabilizar o aproveitamento dos diversos resíduos gerados pela indústria da construção civil, nas etapas de execução e demolição, sendo esses resíduos compostos basicamente por materiais à base de cimento *portland* (concreto e argamassa de revestimento), materiais cerâmicos (blocos e revestimentos cerâmicos) e materiais à base de gesso (argamassa de revestimento e forro).

No entanto, os resíduos de gesso vêm crescendo com o uso das chapas de gesso acartonado (CGA). Este novo insumo é utilizado como divisórias e forros, sendo componentes principais do sistema de construção denominado *drywall*. As CGA cada vez mais ganham espaço no mercado imobiliário, devido aos fortes investimentos dos setores público e privado, visando atender à crescente demanda brasileira por habitação.

No Brasil, esta nova concepção de construção data da década de 1970, com a implantação da primeira fábrica em 1972 na cidade de Petrolina, em Pernambuco, pela *Gypsum* do Nordeste. Trata-se de localização estratégica, uma vez que ali se encontravam grandes quantidades de jazidas de gipsita, mineral usadas na produção de gesso (DE LUCCA, 1974). Muito antes do surgimento da primeira fábrica no Brasil, o sistema *drywall* já era amplamente difundido nos mercados norte-americano, europeu e japonês.

A utilização do sistema é tão intensa na Europa e nos EUA que tais países vêm desenvolvendo diversas soluções de reciclagem para possibilitar o reaproveitamento dos grandes volumes de resíduos de CGA gerados nas etapas de construções, demolições e reformas de habitações, em geral. Nesses países, o gesso reciclado já é bastante utilizado no próprio processo de produção de CGA, nas fábricas de cimento, onde atua como retardador de pega e também para fins de melhoria do solo agrícola. No Brasil, porém, tais aplicações ainda não são correntes.

Neste contexto, os resíduos de gesso, em nível de Brasil comumente são destinados aos lixões ou aterros sanitários, conduzindo a uma problemática ambiental, pois os resíduos quando depositados nos referidos locais, propiciam a formação de gás sulfídrico (H₂S), que além de ser inflamável, é prejudicial à saúde humana e pode promover a contaminação do subsolo. A legislação CONAMA n.º 307 recomenda que os resíduos à base de gesso (enquadrado na classe B) devem ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

Apesar do consumo de *drywall* não ser tão intenso no Brasil (quando comparado com os EUA e a Europa) ocorrências sobre a geração desses resíduos já são observadas por alguns pesquisadores brasileiros. Segundo dados obtidos por John (2003) junto à ABRAGESSO e SINDUGESSO, estima-se que 8% do gesso acartonado transforma-se em resíduos durante a etapa de construção, na grande São Paulo. Marcondes (2007) em sua pesquisa também realizada na grande São Paulo concluiu que os resíduos advindos do processo de produção representam $1,19 \times 10^3$ t/ano, enquanto que os advindo de canteiro de obras somam $3,6 \times 10^3$ t/ano.

Neste sentido, vale ressaltar que consumo de chapas no mercado nacional vêm crescendo em ritmo acelerado. A exemplo, dados da Associação Brasileira dos Fabricantes de Chapas para *Drywall* (ASSOCIAÇÃO DRYWALL) divulgaram que em 2006, 15,5 milhões de m² de chapas foram consumidas. Em 2008, o consumo aumentou para 20 milhões de m², enquanto que em 2010, o consumo disparou para 33 milhões de m² de chapas. Desta forma, pode-se projetar que a médio ou a longo prazo a deposição de resíduos de CGA (provenientes de construção, reformas ou demolição) pode vir a ser um problema tão real quanto os já observados para os resíduos à base de cimento e de natureza cerâmica, por exemplo.

Todo este cenário motivou a realização do presente trabalho e na busca de reutilizar os resíduos de gesso das CGA, verificou-se como alternativa tecnicamente viável, o seu uso em pavimentação asfáltica, especificamente em ligantes asfálticos (CAP) e revestimento asfáltico do tipo concreto betuminoso usinado à quente (conhecido também por concreto asfáltico).

De acordo com Leite (1999) muito embora os CAPs convencionais possuam propriedades mecânicas satisfatórias para a grande maioria das condições climáticas e de tráfego no Brasil, em determinados locais as condições mais agressivas de tráfego impõem certos limites aos CAP convencionais.

Outros estudos (apresentados no capítulo de revisão bibliográfica) apontam que quando fíleres são adicionados ao CAP, ocorrem melhorias físicas, químicas e reológicas ao material, percebidas através do aumento da resistência à fadiga e à deformação permanente, mitigação do envelhecimento e redução da suscetibilidade térmica. Tais propriedades são muito importantes para o bom desempenho do pavimento e tendem a aumentar a sua durabilidade.

Outro ponto favorável ao reaproveitamento das CGA é o fato destas possuírem composição conhecida e padronizada, ou seja, não dispõem de heterogeneidade, quando comparado, por exemplo com o gesso de sobras de argamassas de revestimento. No caso de misturas asfálticas, conhecer a composição e as propriedades do material que irá modificar o ligante asfáltico é muito importante para o entendimento do comportamento do próprio ligante e das misturas asfálticas.

1.2 OBJETIVO GERAL

A pesquisa tem por objetivo estudar o potencial dos resíduos de gesso, advindos de CGA como fíler para pavimentação, avaliando qual o efeito da adição desse material nas propriedades físicas do ligante asfáltico (CAP 50/70) e posteriormente, no comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo CA (concreto asfáltico).

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa contemplam os seguintes aspectos:

- Transformação do gesso oriundo das CGA em fíler para modificar o CAP e ser utilizado como fíler alternativo em CA;

- Caracterização do fíler gesso, a fim de investigar as suas propriedades e efeitos quando da adição aos ligantes asfálticos e misturas asfálticas;
- Caracterização dos materiais que compõem a mistura asfáltica do tipo CA (CAP 50/70, agregado graúdo e miúdo e fíler calcário);
- Produção de CAPs de referência (isento de gesso) e modificados com gesso, nos teores: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, em relação à massa do CAP referência;
- Determinação e análise das propriedades físicas dos CAPs modificados e do CAP de referência;
- Produção de misturas asfálticas do tipo CA contendo fíler gesso, em substituição ao fíler calcário, nas seguintes proporções 20%, 40%, 60%, 80% e 100% para análise das propriedades mecânicas das misturas.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho está dividido em seis (6) capítulos que a seguir serão descritos, de forma resumida, apresentando o assunto que será tratado por cada um deles:

Capítulo 1: Introdução - Expõe a problemática a ser estudada situando-a no contexto nacional e internacional. Em seguida são expostas as justificativas da pesquisa e, por fim, colocam-se os objetivos pretendidos neste trabalho.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica - Apresenta as definições de Concreto Asfáltico (CA) e os materiais que o compõem. Neste contexto, são citadas pesquisas, as quais trataram do uso de adições em ligantes asfálticos e CA, destacando as conclusões obtidas nestes estudos. Aborda aspectos sobre a produção e consumo de CGA, geração de resíduos e soluções de reciclagem adotadas em alguns países, além de aspectos sobre a legislação brasileira.

Capítulo 3: Materiais e métodos - Descreve sobre a obtenção e caracterização dos materiais que serão utilizados na produção dos CAPs de referência e modificados e das composições asfálticas (CA) de referência e contendo fíler gesso. Apresenta os métodos de ensaios para a determinação das propriedades físicas dos CAPs modificados.

Capítulo 4: Dosagem e caracterização mecânica das misturas asfálticas – Descreve a metodologia de dosagem utilizada para a produção das misturas asfálticas (CA) de referência e contendo fíler gesso. Na sequência são apresentados os métodos de ensaios utilizados para a caracterização mecânica das misturas asfálticas (corpos de prova).

Capítulo 5: Apresentação e análise dos resultados: Apresenta a análise dos resultados obtidos: nos ensaios de caracterização dos materiais, nas propriedades físicas dos CAPs de referência e modificados com fíler gesso e nas propriedades mecânicas dos CA de referência e com adição de fíler gesso.

Capítulo 6: Conclusões - Apresenta as conclusões gerais observadas a partir dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, verificando o atendimento dos objetivos propostos por este trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre revestimento asfálticos do tipo Concretos Asfálticos (CA) e os materiais que o constituem; cimento asfáltico de Petróleo (CAP), agregados e fíler. Também serão citadas pesquisas dedicadas aos estudos sobre adições de materiais alternativos em misturas asfálticas, realizadas no contexto nacional e internacional.

É parte deste capítulo ainda, a abordagem sobre a composição, o processo de produção e dados do consumo de CGA, matéria prima que será utilizada em substituição ao fíler tradicional nos CA. E por fim, aspectos sobre a legislação ambiental brasileira com relação ao uso e destinação dos resíduos de construção e demolição, oriundos do gesso.

2.1 CONCRETO BETUMINOSO USINADO À QUENTE

O concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ), também conhecido por concreto asfáltico (CA) é um dos revestimentos asfálticos mais utilizado no Brasil. Trata-se de uma mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (fíler) se necessário e cimento asfáltico, espalhada e compactada a quente (DNIT 031/2006 - ES). A Figura 2.1 apresenta o aspecto de um corpo de prova de CA.



Figura 2.1 – Exemplo de corpo de prova de concreto asfáltico.

A composição do CA deve satisfazer aos requisitos prescritos pela DNIT 031/2006 – ES, a qual estabelece faixas granulométricas a serem utilizadas e os percentuais do ligante asfáltico determinados pelo projeto da mistura. Os percentuais de ligante asfáltico (CAP) nas composições de CA variam geralmente entre 4,0 a 9,0%.

2.1.1 Materiais constituintes do concreto asfáltico

2.1.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP, comumente chamado de asfalto, segundo Leite (1990), é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e apresenta pouca reatividade química, o que confere boa durabilidade. Porém, o contato com o ar propicia oxidação lenta, que pode ser acelerada pelo aumento da temperatura .

É um produto semi-sólido quando submetido à temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido à altas temperaturas¹. A Figura 2.2 apresenta o aspecto da viscosidade do CAP quando aquecido a altas temperaturas.



Figura 2.2 – Aspecto da viscosidade do CAP quando aquecido.

No Brasil, os cimentos asfálticos são classificados de acordo com a penetração, medida a 25°C, onde tem-se a sigla CAP seguida dos números associados à faixa de penetração obtida no ensaio (valor mínimo e máximo). Logo, existem quatro diferentes tipos de ligantes: CAP 30/45; CAP 50/70; CAP 85/100 e CAP 150/200, conforme a DNIT 095/2006.

¹ Segundo Bernucci *et al.* (2006) a faixa de temperatura correspondente à transição entre sólido e líquido é influenciada pela proporção de quatro componentes do ligante asfáltico (saturados, asfaltenos, resinas e aromáticos) e pela interação entre eles.

De acordo com Coelho (1992) as propriedades plásticas de um concreto asfáltico são fortemente influenciadas pelo comportamento do CAP, diante das variações de temperatura e das ações do tráfego. Sendo assim, ligantes mais viscosos, ou de menor penetração, tendem a produzir misturas mais rígidas (ou menos plásticas), com maior estabilidade e menor fluência, sendo mais adequadas a regiões de clima mais quente e de tráfego elevado.

O bom desempenho mecânico e a durabilidade de uma mistura asfáltica depende da dosagem adequada, ou seja, da quantidade de ligante e da composição granulométrica. O excesso de ligante pode acarretar uma superlubrificação das partículas granulares, reduzindo drasticamente o seu atrito interno e produzindo misturas com tendência à instabilidade e baixa resistência à deformação. Por outro lado, as misturas com ligante insuficiente, podem expor a camada asfáltica aos riscos de desagregação granular com a diminuição da sua estabilidade, durabilidade e flexibilidade (Road Research Laboratory, 1962 *apud* Coelho, 1992).

A avaliação cuidadosa das propriedades do ligante asfáltico, seja ele modificado ou não, é imprescindível para uma posterior avaliação da mistura asfáltica resultante. Para se especificar um determinado asfalto como adequado para pavimentação, são utilizadas medidas simples de características físicas do ligante, pela facilidade de execução nos laboratórios de canteiros obras.

As duas principais características utilizadas são a dureza, medida através da penetração de uma agulha padrão na amostra de ligante, e a resistência ao fluxo, medida através de ensaios de viscosidade. No entanto, ao longo dos anos acrescentaram-se nas especificações outros critérios de aceitação que são associados a ensaios empíricos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Atualmente, no Brasil, os ensaios são realizados de acordo com a Resolução ANP (Agências Nacional de Petróleo) nº19 de 11/07/2005 e DNIT EM 095/2006 onde, os ligantes brasileiros devem se enquadrar em especificações que contemplem características sobre consistência, durabilidade, pureza e segurança ao manuseio do material.

É importante ressaltar que a resolução ANP também agrega alguns ensaios da metodologia americana proposta pelo programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) o qual veio somar positivamente nos estudos para avaliação do ligante asfáltico.

O programa criado nos EUA veio de forma contundente confrontar as antigas especificações americanas (ASTM) de cimentos asfálticos que, assim como as brasileiras, eram baseadas em resultados de ensaios de natureza empírica. Assim pesquisadores americanos criaram novos requisitos baseados em ensaios reológicos com critérios relacionados ao desempenho em serviço. As novas especificações resultantes desta pesquisa originaram uma nova metodologia denominada *SUPERPAVE (Superior Performance Pavements)*.

Segundo Lucena (2005) dentro desta nova metodologia encontram-se ensaios como: (a) o ensaio de viscosidade *Brookfield*; (b) o ensaio de envelhecimento na estufa RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) e (c) DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) que visam controlar ou eliminar três tipos de falhas em pavimentos: deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico.

Os procedimentos experimentais adotados para avaliar as propriedades dos cimentos asfálticos serão descritos no Capítulo 3 (Materiais e Métodos).

2.1.1.2 Agregados

A quantidade de agregado mineral em misturas asfálticas de pavimentação é geralmente de 90 a 95%, em peso e 75 a 85%, em volume. O agregado mineral é fundamentalmente responsável pela capacidade de suporte de cargas dos pavimentos. Portanto, o desempenho dos pavimentos asfálticos é muito influenciado pelo agregado (INSTITUTO DE ASFALTO, 2001).

Segundo Coelho (1992) os materiais granulares exercem grande influência nos parâmetros volumétricos e mecânicos do concreto asfáltico. Para isso, deve-se levar em consideração: a composição mineralógica, a forma (geometria), a textura superficial, a porosidade e a granulometria dos agregados, bem como a proporção dos diversos materiais granulares na composição da mistura.

Os agregados de forma cúbica e angulosa e de textura rugosa ou áspera proporcionam um aumento do ângulo de atrito interno entre os grãos e uma melhor ligação asfalto-agregado, elevando assim a estabilidade da mistura.

O agregado deve possuir um certo grau de porosidade, a qual deve proporcionar uma melhor adesão entre o agregado e o ligante. Porém, segundo Bernucci *et al.* (2006) quando o agregado for muito poroso, este irá absorver grande quantidade de ligante, consumindo parte deste material, necessário para dar coesão a uma mistura asfáltica, diminuindo assim a espessura do ligante que envolve os agregados.

Segundo Bonet (2002), a granulometria é responsável pela distribuição interna dos grãos, de maneira que acontece um contato mais íntimo entre as partículas de grãos maiores e as partículas de grãos menores. A função das partículas de grãos menores é preencher os vazios deixados pelos grãos maiores. Falhas na curva granulométrica (ausência de determinados tamanhos de partículas) podem gerar misturas com qualidade não satisfatória.

Os agregados são classificados quanto ao tamanho para o uso em misturas asfálticas em: agregado graúdo, agregado miúdo e material de enchimento ou filler. Conforme a DNER-EM 037/97, os agregados graúdos são materiais granulares provenientes de rochas, comprovadamente inertes e de características semelhantes, cujos grãos ficam retidos na peneira de 4,8 mm de abertura.

Para os concretos asfálticos, os agregados graúdos utilizados, segundo a DNIT 031/2006 ES podem ser basicamente pedra britada, escória e seixo rolado preferencialmente britado.

A norma específica também que os agregados graúdos devem apresentar no geral, limites máximos relacionados a determinadas características que permitam sua maior durabilidade e adequabilidade ao uso, são elas: desgaste *Los Angeles*, índice de forma, resistência a ataques químicos e etc. Tais métodos de ensaio serão apresentados no capítulo 3.

De acordo com a DNER-EM 038/97, os agregados miúdos são materiais cujos grãos passam pela peneira de 4,8mm de abertura e ficam retidos na peneira de 0,075mm. Para concreto asfáltico a DNIT 031/2006 ES recomenda o uso de areia, pó de pedra ou a mistura de ambos. Tal como os agregados graúdos, estes materiais também precisam estar adequados ao uso em concretos asfálticos, por isso a norma também descreve métodos de ensaios que permitam avalia-los e qualifica-los.

2.1.1.3 Fíler (material de enchimento)

O material de enchimento ou fíler, conforme DNER-EM 367/97 deve ser um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 0,075mm de abertura, atendendo a granulometria apresentada na Tabela 2.1. Quando da aplicação em concreto asfáltico, a norma DNIT 031/2006 ES cita que podem ser utilizados os seguintes materiais como fíler: cimento *Portland*, cal extinta, pós calcários, cinza volante, etc.

Tabela 2.1 – Granulometria requerida para os fíleres, segundo DNIT 031/2006 ES.

Abertura de malha (mm)	% em peso passando
0,42	100
0,18	95-100
0,075	65-100

Segundo Pinilla (1965) o fíler tem duas funções básicas em uma mistura asfáltica: preencher os vazios entre os agregados graúdos e miúdos, ajudando a formar o esqueleto mineral (fíler agregado) e aumentar a viscosidade do ligante e, portanto, sua resistência à deformação (fíler ativo).

Estes dois caminhos de atuação na mistura asfáltica dependem basicamente da granulometria dos fíleres utilizados: partículas maiores ($> 40 \mu\text{m}$) tendem a preencher os vazios dos outros agregados e as partículas menores ($< 20 \mu\text{m}$) misturam-se com o ligante, formando o que alguns autores chamam de “mástique”, aumentando a sua viscosidade e o seu ponto de amolecimento e diminuindo a suscetibilidade térmica do mesmo (MOTTA; LEITE, 2000).

Para Al-Quadi *et al.* (2009) o mástique asfáltico é o material formado pela mistura dos finos minerais com o ligante asfáltico e pode ser entendido como um componente da mistura asfáltica que liga os agregados, e como o componente da mistura que sofre deformação quando o pavimento é submetido ao carregamento do tráfego. Portanto, as características do fíler podem influenciar significativamente as propriedades do mástique e, conseqüentemente, causar alterações importantes no desempenho da mistura asfáltica. O fíler influencia o desempenho mecânico do mástique, física e quimicamente, e, por conseguinte, das misturas asfálticas.

Balbo (2007) comenta em seu livro que os fíleres adicionados à mistura têm a função de aumentar de viscosidade do CAP, gerando incremento do ponto de amolecimento, da estabilidade, do módulo de resiliência e da resistência, melhorando o desempenho reológico, mecânico, suscetibilidade térmica e sensibilidade à água.

Quando a porcentagem de fíler aumenta na mistura asfáltica, reduzem-se os vazios do esqueleto mineral e aumenta-se a trabalhabilidade da mistura asfáltica até certo ponto. Acima de um determinado teor, o fíler começa a prejudicar a trabalhabilidade bem como a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo os contatos entre as partículas grossas, alterando também a capacidade de compactação da mistura.

Para os CA, a composição granulométrica (agregados e fíler) deve satisfazer aos requisitos recomendados pela norma DNIT 031/2006 ES, além de obter em sua mistura certo percentual de ligante asfáltico, conforme a Tabela 2.2. Nesta Tabela pode ser visto também três faixas granulométricas (A, B e C), definidas de acordo com a espessura da camada de revestimento; a faixa usada deve ser aquela, cujo diâmetro máximo do agregado é inferior a $2/3$ da espessura da camada.

Na presente pesquisa será adotada a faixa C para a composição dos corpos de prova de CA, devido ser esta a faixa mais utilizada no Distrito Federal.

Tabela 2.2 – Composição granulométrica do C de acordo com as faixas granulométricas A, B e C estabelecidas pela norma do DNIT 031/2006-ES.

Peneira de malha quadrada		% em massa passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 -100	100	-	±7%
1"	25,4	75 – 100	95 – 100	-	±7%
¾"	19,1	60 – 90	80 – 100	100	±7%
½"	12,7	-	-	80 – 100	±7%
3/8"	9,5	35 – 65	45 – 80	70 – 90	±7%
Nº4	4,8	25 – 50	28 – 60	44 – 72	±5%
Nº10	2,0	20 – 40	20 – 45	22 - 50	±5%
Nº40	0,42	10 – 30	10 -32	8 - 26	±5%
Nº80	0,18	5 – 20	8 – 20	4 – 16	±3%
Nº200	0,075	1 – 8	3 – 8	2 - 10	±2%
		4,0 – 7,0	4,5 – 7,5	4,5 – 9,0	±0,3%
Asfalto solúvel no CS ₂ (+) (%)		Camada de ligação (Binder)	Camada de ligação e rolamento	Camada de rolamento	

2.1.2 Ligantes modificados e misturas asfálticas com adições: Pesquisas realizadas

A busca sempre constante de novos materiais que melhorem o desempenho dos pavimentos asfálticos levou ao desenvolvimento e uso de asfaltos modificados que visam ampliar a faixa de utilização dos ligantes rodoviários (Leite, 1999). Neste sentido, resíduos originados de diversas indústrias começaram a ser utilizados pelos pesquisadores, uma vez que, quando misturados ao asfalto haveriam ganhos ambientais também.

Dentre os agentes modificadores de ligantes já estudados, pode-se destacar o uso de polímeros obtidos de resíduos industriais: SBS (copolímero de estireno-butadieno-estireno), polietileno, SBR(copolímero estireno- butadieno), EVA (copolímero estileno- acetato de vinila) e resíduos de borracha de pneus de veículos. Ainda, a utilização de fibras, tais como: celulose, poliéster, polipropileno e aramida e, uso de fíleres como: cal, cimento, pó de calcário, pó de pedra, etc.

A incorporação destes resíduos melhoram o desempenho do CAP, ao mesmo tempo em que minimiza um problema ambiental, no caso, a deposição de lixo gerado por diversas indústrias. A seguir serão apresentadas algumas pesquisas já realizadas com alguns desses materiais modificantes do CAP.

Leite (1999) realizou um importante estudo sobre a formulação e caracterização de asfaltos modificados por polímeros do tipo, SBS, EVA, PE, SBR e ainda por borracha moída de pneu. A autora relata que há cerca de trinta anos foi verificado que a adição de polímeros ao asfalto melhora consideravelmente suas propriedades, especialmente a resistência à fratura a baixas temperaturas e ao escoamento, sob condições de aquecimento elevado.

De acordo com Leite (1999) alguns trabalhos pioneiros envolvendo mistura de asfalto com polímero já foram realizados, tal como o do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER no Rio de Janeiro em 1990 que chegou a recobrir um trecho de aproximadamente 300 metros com asfalto modificado por SBS e outros 300m com asfalto modificado por EVA, em comparação com ligante tradicional. A PETROBRAS tem desenvolvido pesquisas abordando esse tema e iniciou a comercialização de asfaltos modificados por SBS e SBR a partir de 1998.

Morilha Junior (2004) estudou a influência da adição de polímeros SBS, EVA e borracha moída de pneu no envelhecimento dos ligantes asfálticos. O pesquisador concluiu que ligantes asfálticos modificados apresentaram melhor resistência ao envelhecimento do que os ligantes tradicionais, sendo que os modificados por EVA e por borracha moída de pneus, apresentaram melhora na recuperação elástica após o ensaio RTFOT.

Gouveia *et al.* (2013) analisou ligantes (CAP 50/70) modificados com resíduo de gesso oriundo de chapas de gesso acartonado. Entre os resultados obtidos, pode-se destacar o aumento da viscosidade e a diminuição da suscetibilidade térmica do ligante, assim como a melhoria nas propriedades reológicas determinadas por meio do ensaio DSR.

Oda *et al.* (2005) realizaram um estudo sobre a utilização de borracha moída de pneus em misturas asfálticas contemplando a construção e avaliação do primeiro trecho experimental com asfalto-borracha na Bahia. A mistura asfáltica selecionada foi um SMA² (*Stone Matrix Asphalt*) formado por agregados e ligante asfalto-borracha (CAPFLEX B). O CAPFLEX B é o asfalto-borracha da Petrobras Distribuidora. Após a primeira avaliação da pista, os autores verificaram que o revestimento com asfalto-borracha conferiu ganhos de atrito e de drenabilidade superficial ao trecho experimental, garantindo, além disso, boa visibilidade, com redução da aquaplanagem em dias de chuva.

Os autores Kütük-Sert e Kütük (2013) utilizaram fosfogesso³ como fíler em misturas asfálticas do tipo CBUQ e concluíram que teor ótimo de asfalto obtido a partir da mistura com fosfogesso foi menor do que os determinados para as misturas isentas deste material. Os parâmetros volumétricos (RBV, VAM, Vv, da) das misturas com e sem fosfogesso foram muito próximos.

A estabilidade da mistura com resíduo foi menor em relação à mistura padrão. No entanto, os valores de fluência de ambos os tipos não foram muito diferentes. As misturas com a adição de fosfogesso mostraram um comportamento rígido. Embora o desempenho dos ensaios Marshall para as misturas com fosfogesso tenham sido menores, a adição deste pode ser adequada para ligantes utilizados em camada de ligação.

² SMA – revestimento asfáltico, usinado à quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, contendo uma elevada percentagem desses agregados e por isso apresenta grande volume de vazios, que são preenchidos por um mástique asfáltico constituído pela fração areia, fíler, ligante asfáltico e fibras (BERNÚCCI *et al.*, 2006).

³ O fosfogesso é um subproduto sólido gerado pelas indústrias de fertilizantes fosfatados durante a produção do ácido fosfórico (H₃PO₄) (CHANG & MANTELL, 1990).

Specht (2004) estudou asfalto modificado com borracha reciclada de pneus e misturas asfálticas contendo o mesmo asfalto borracha. Ambos foram caracterizados segundo ensaios tradicionais e por meio da metodologia SUPERPAVE. Os resultados demonstraram superioridade, tanto dos ligantes modificados, quanto das misturas preparadas com tais ligantes. A adição de 12% a 18% de borracha ao ligante promoveu maiores resistências à fadiga e deformação permanente às misturas asfálticas.

Alencar (2005) modificou CAP 50/60 com adição de copolímero EVA proveniente do resíduo da indústria de calçados. Os resultados indicaram que CAP's modificados apresentaram maior estabilidade em amostras oxidativas do que em atmosfera inerte. Os ensaios de ponto de amolecimento, suscetibilidade térmica e retorno elástico, indicaram que os CAP's modificados, tiveram uma melhoria nas suas propriedades, em relação ao CAP's não modificados. A Figura 2.3 apresenta imagens do resíduo de EVA.



Figura 2.3 – Resíduo de EVA em forma de aparas e em pó oriundos do processo de produção de calçados (ALENCAR, 2005).

Em relação ao uso de fibras como agentes modificantes, Souza (2010) avaliou a influência de fibras de polipropileno e de aramida incorporadas ao CAP 50/70 (ligante convencional) (Figura 2.4).

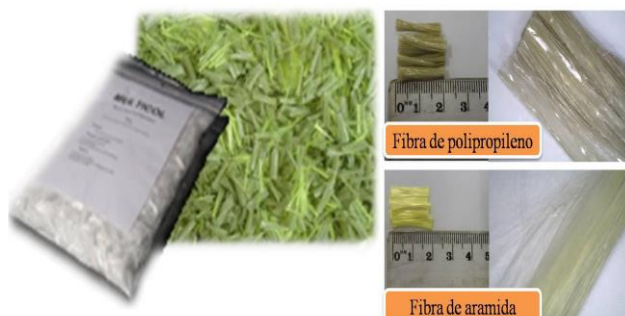


Figura 2.4 - Detalhe das fibras usadas para adição nas misturas asfálticas: aramida e polipropileno (SOUZA, 2010).

As fibras de polipropileno supostamente agem como modificante, incorporando-se ao CAP puro, enquanto que as fibras de aramida permanecem intactas fornecendo um reforço mecânico à matriz de uma mistura asfáltica. Foram produzidas amostras de CAP e fibras em diferentes teores (0% a 3%) e foram realizados ensaios convencionais das propriedades dos ligantes. Observou-se melhora na maioria dos parâmetros físicos do ligante com o aumento do teor de fibras.

O autor também avaliou o efeito das fibras de polipropileno e de aramida nas propriedades mecânicas de uma mistura do tipo CPA (camada porosa de atrito). Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, desgaste Cantabro, fadiga e fluência estática (*creep*), e no geral apresentaram maior resistência à tração, módulos de resiliência mais elevados e maior vida de fadiga, comparados com a mistura padrão, entretanto obtiveram maior desgaste Cantabro e deformações permanentes mais elevadas.

Leite e Motta (2002) realizaram estudos de envelhecimento e de determinação de características reológicas dos mástiques resultantes das misturas de três diferentes fíleres com CAP 20 e CAP 40, ressaltando a importância do teor, tipo e da granulometria do fíler. As autoras concluem que cuidado deve ser tomado com o excesso da fração fina do fíler, pois causa o enrijecimento do mástique podendo isto ser danoso ao pavimento. Ainda, recomendam estudos de caracterização de fíleres, bem como a definição de limites mínimos e máximos da fina fração do fíler em misturas betuminosas.

Mourão (2003) utilizou em sua pesquisa dois ligantes; convencional (CAP 50/60) e AMP (CAP 20 modificado com 6,5% de SBS) e três tipos de fíleres: pó calcário + 1,5% de cal hidratada especial, cimento *portland* CP II E 32 e pó de pedra de granito. Cada fíler foi adicionado aos CAP puro e modificado, resultando em seis composições. O autor avaliou misturas asfálticas do tipo SMA. No ensaio de compressão axial dinâmica (“*creep*” dinâmico) a mistura com AMP e fíler cimento *portland* obteve as menores deformações permanentes.

Quanto à vida de fadiga, em ensaios de compressão diametral, ligeira vantagem sobre as demais, apresentou as misturas SMA com fíler calcário. A mistura com CAP 50/60 e fíler pó de pedra mostrou vida de fadiga mais sensível ao estado de tensões do ensaio de tração indireta.

Freitas (2010) estudou a aplicação de resíduos de gesso (coletados após a etapa de acabamento de uma obra) como fíler em misturas asfálticas do tipo CBUQ (Figura 2.5). Através da metodologia *Marshall*, determinou o teor de ligante de projeto para uma mistura sem gesso e misturas com 2% e 4% do resíduo entre os agregados, as quais se enquadraram na faixa “C” do DNIT. Foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, determinação da vida de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, desgaste Cantabro, dano por umidade e deformação plástica por compressão uniaxial, sob carga estática.



Figura 2.5 – Aspecto do resíduo de gesso coletado na obra (à esquerda); resíduo de gesso após peneiramento em malha # 200 (FREITAS, 2010).

Os resultados demonstraram que a adição do gesso, até certo limite, reduziu o consumo de ligante, atendendo aos requisitos das especificações vigentes do DNIT e melhorou as características mecânicas das misturas. O pesquisador concluiu que uso de resíduos de gesso, com percentual de 2% em concretos asfálticos torna-se uma alternativa tecnicamente viável para a destinação deste rejeito.

2.2 CHAPAS DE GESSO ACARTONADO (CGA)

2.2.1 Processo de produção e composição das CGA

As CGA são elementos que compõem o sistema construtivo denominado *drywall* (paredes secas), o qual utiliza perfis metálicos que servem de estruturas para paredes internas e tetos onde são fixadas as CGA (Figura 2.6). Essas chapas são constituídas basicamente por gesso (“miolo”) e faceadas por papel cartão.



a) Instalação de divisórias de CGA

b) Instalação de forro de CGA

Figura 2.6 – Divisórias e forros de CGA (Sistema *drywall*).

Segundo Marcondes (2007) o processo de produção das CGA consiste basicamente de duas etapas. A primeira denominada calcinação que é a transformação do minério de gipsita em gesso, ou seja, do sulfato de cálcio di-hidratado ($CaSO_4 + 2H_2O$) em hemi-hidratado ($CaSO_4 + \frac{1}{2}H_2O$) (conforme Equação 2.1), o que acontece em um moinho calcinador. Neste processo ocorre a perda de água de constituição da gipsita de aproximadamente 18%.



Após a calcinação o gesso é resfriado e segue para a segunda etapa, a de fabricação da chapa propriamente dita. A fabricação da chapa consiste nas fases de dosagem, cura e secagem.

No processo de dosagem, o gesso recebe aditivos e água até atingir consistência ideal para ser lançado sob a lâmina inferior de papel cartão. Em seguida é aplicada a lâmina superior do papel cartão e a chapa passa por um sistema de calandras para garantir a espessura uniforme da chapa.

Em um processo contínuo, segue na mesa formadora onde acontece o processo de cura (o gesso reage com a água, provocando o endurecimento da placa). Segue para a guilhotina onde será cortada nos comprimentos desejados e depois para o secador. Por fim, as chapas são identificadas e paletizadas. A Figura 2.7 ilustra algumas etapas do processo de produção das CGA.



a) estiramento da bobina de papel cartão



b) mistura lançada sobre o papel



c) extrusora que define a espessura



d) adição da segunda folha de cartão



e) etapa de cura na correia de formação



f) corte da placa

Figura 2.7 – Etapas do processo de produção das CGA (GEROLA, 2012).

Sobre a composição das CGA, Marvin (2000) comenta que são formadas por 92% de gesso, 7% em papel cartão e 1% de aditivos e impurezas. Não se tem informações completas sobre a composição das CGA, uma vez que, estes produtos fazem parte do segredo industrial de cada fabricante. Entretanto, obteve-se nesta pesquisa informações junto ao fabricante sobre a composição das chapas a serem utilizadas nos ensaios laboratoriais, porém sem indicação da dosagem, apenas dos constituintes do material (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Composição das CGA utilizadas nesta pesquisa, segundo informações do fabricante.

Gesso
Amido
Acelerador de cura
Cimento
Ácido bórico
Fibra de vidro
Vermiculita
Papel jornal
Liquificante
Parafina
<u>Concentrador de espuma</u>

No Brasil, a produção das CGA é realizada por três empresas multinacionais: BPB Placo (francesa), *Lafarge Gypsum* (francesa) e *Knauf* do Brasil (alemã). Os produtos podem ser encontrados no mercado (conforme recomendações da ABNT NBR 14715) nas espessuras de 9,5 mm, 12,5 mm ou 15 mm e nas seguintes dimensões; largura variando de 600 mm a 1200 mm e comprimento variando de 1800 mm a 3600 mm.

As chapas são classificadas por tipo, de acordo com o local a ser aplicada, conforme Tabela 2.4. Neste trabalho, buscou-se utilizar chapas do tipo *standard*, devido ser a mais empregada nas construções, em geral.

Tabela 2.4 – Tipos de CGA segundo a NBR 14715.

Tipos de chapa	Código	Aplicações
<i>Standard</i>	ST	Paredes, revestimentos e forros em áreas secas
Resistente à umidade	RU	Paredes, revestimentos e forros em áreas sujeitas à umidade por tempo limitado (de forma intermitente)
Resistente ao Fogo	RF	Paredes, revestimentos forros em áreas secas, com chapas especialmente resistentes ao fogo.

2.2.2 Consumo e geração dos resíduos de CGA

O sistema *drywall* vem ganhando mais espaço no mercado brasileiro de construção. Esse fator, aliado ao aquecimento da economia nacional e ao avanço dos lançamentos imobiliários devido a maiores incentivos de créditos por parte do governo, têm garantido um consumo de *drywall* mais intenso na construção civil.

Dados da ASSOCIAÇÃO DRYWALL (2011) demonstram que desde o ano 2004 até 2010, os números do consumo só aumentaram. Em 2010, comparado com o ano anterior, foram consumidas cerca de 33 milhões de m² de chapas contra 26 milhões de m² em 2009, representando um incremento de aproximadamente 22% no consumo (Figura 2.8).

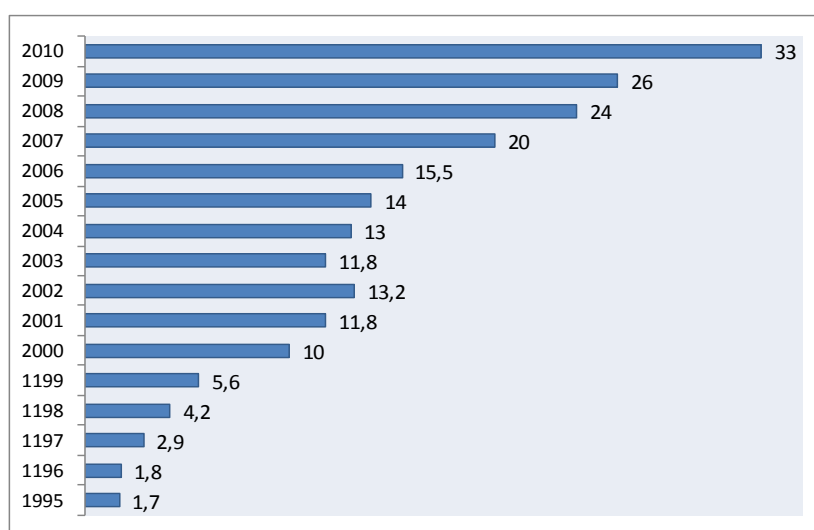


Figura 2.8 - Evolução anual do consumo de chapas *drywall* no Brasil (mil m²) (Dados adaptados da ASSOCIAÇÃO DRYWALL, 2011).

Em relação à cidade de Brasília, dados sobre o consumo das CGA foram obtidos por meio de contato pessoal, junto a um dos membros da ASSOCIAÇÃO DRYWALL. Observa-se no gráfico da Figura 2.9, o acréscimo sucessivo do consumo, em quase todos os anos, com exceção do ano de 2003. O último dado mostra que em 2009, 1.358 mil m² de CGA foram consumidas em Brasília.

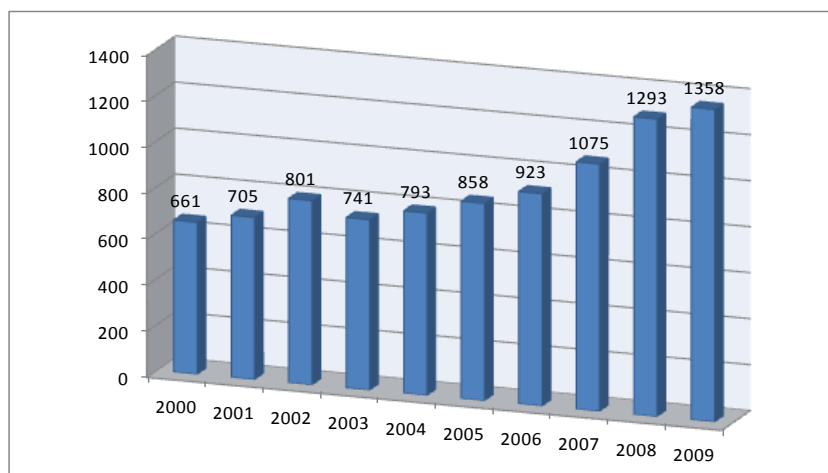


Figura 2.9 – Consumo de CGA na cidade de Brasília – DF no período de 2000 a 2009, em mil m² (Dados adaptados da ASSOCIAÇÃO DRYWALL, 2010).

Partindo para uma análise regional, o centro oeste ocupa o penúltimo lugar no consumo de chapas, sendo a região sudeste, a líder entre as demais regiões. O estado de São Paulo apresenta-se em destaque, separado da região sudeste, sendo este o maior consumidor de chapas, no cenário nacional (Figura 2.10).

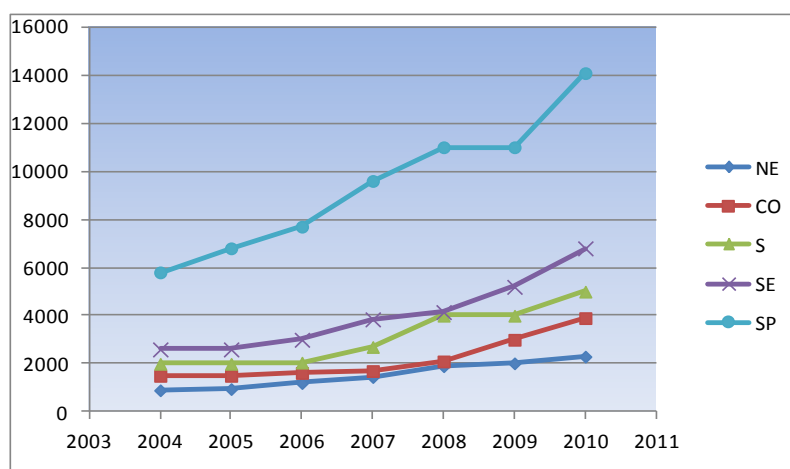


Figura 2.10 – Consumo de CGA por região no período de 2004 a 2010, em m² (Dados adaptados da ASSOCIAÇÃO DRYWALL, 2011).

Observa-se que o mercado responde positivamente à utilização do sistema *drywall*, conforme demonstra a evolução do consumo no país. Ainda assim, o Brasil ocupa posição bastante modesta no cenário internacional, quando comparado, por exemplo, com os EUA, o maior consumidor de CGA. Este fato não causa surpresas, uma vez que, mesmo com o aumento do uso do sistema *drywall* no Brasil, a utilização de blocos cerâmicos para a construção de paredes ainda é amplamente praticada, existindo argila em abundância para atender o mercado, enquanto que nos EUA as construções utilizam basicamente as CGA, sendo uma tecnologia consolidada há muitos anos neste país.

A Figura 2.11 apresenta alguns números sobre a utilização do *drywall* no Brasil e no mundo.

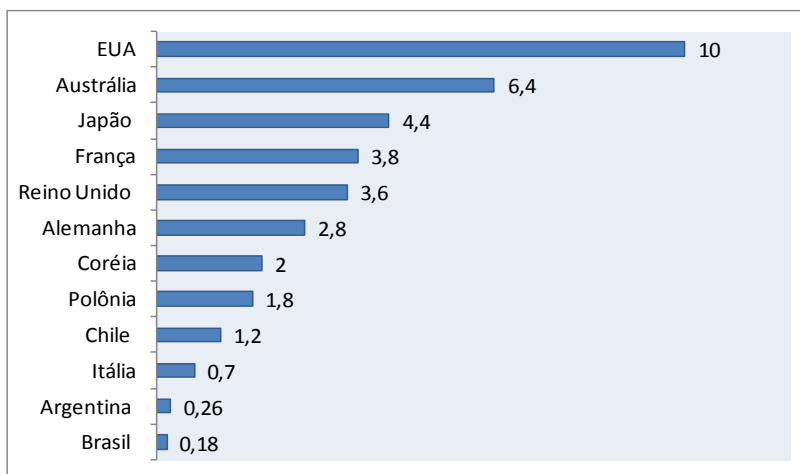


Figura 2.11 – Consumo mundial de CGA (m² por habitante /ano) (Dados adaptados da ASSOCIAÇÃO DRYWALL, 2011).

Neste cenário de crescente aumento do consumo do *drywall* no país, tem-se que, mesmo sendo considerado um subsistema racionalizado, ainda na etapa de construção/execução, ocorre a geração de resíduo em canteiro de obras devido ao corte das chapas. Outra forma de ocorrência do resíduo é durante a produção das CGA devido à incidência de defeitos de produção, ou seja, não conformidades.

A Figura 2.12 apresenta a imagem de resíduos obtidos do processo de produção depositados no pátio de uma fábrica visitada, com o objetivo de subsidiar informações importantes para o desenvolvimento da pesquisa.



Figura 2.12 – Resíduos de CGA dispostos no pátio de uma fábrica, resultantes do processo de produção.

Pode-se dizer que, poucos trabalhos apresentam dados sobre geração de resíduos de CGA, no Brasil. Dentre os primeiros, tem-se John (2003a) que discutiu sobre alternativas de gestão dos resíduos de gesso, onde comenta que 5% do gesso acartonado transforma-se em resíduos durante a etapa de construção, de acordo com informações obtidas junto à Associação Brasileira de Gesso – ABRAGESSO.

John (2003b) em outro trabalho de sua autoria apresenta dados acerca da geração de resíduos, à base de gesso na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). O valor encontrado somente na etapa de construção equivale a 4,8 mil t/ano. O autor também informa (a partir de dados do SINDUSGESSO e ABRAGESSO), os tipos de fontes geradoras desses resíduos e seus respectivos percentuais, conforme pode ser visto na Figura 2.13.

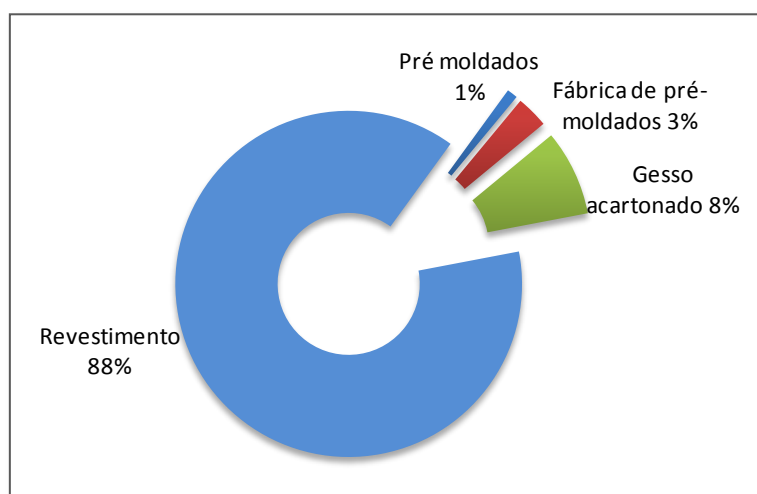


Figura 2.13 - Fontes de resíduos de gesso obtidos na etapa de construção na RMSP (Adaptado de JOHN, 2003b).

Marcondes (2007) realizou um estudo mais focado na análise da cadeia produtiva das CGA, identificando os agentes participantes de todo o processo do ciclo de vida das chapas e ainda, estimando o volume de resíduo de CGA gerados na RMSP.

Com base nos dados coletados sobre as perdas de material (informados pelos fabricantes, construtoras, distribuidores e instaladores) e considerando que uma CGA possui $8,5\text{Kg/m}^2$ a autora estima o volume de resíduos de CGA gerados no processo de produção e os advindos dos canteiros de obra; 1,19 mil t/ano e 3,6 mil t/ano, respectivamente (Figura 2.14).

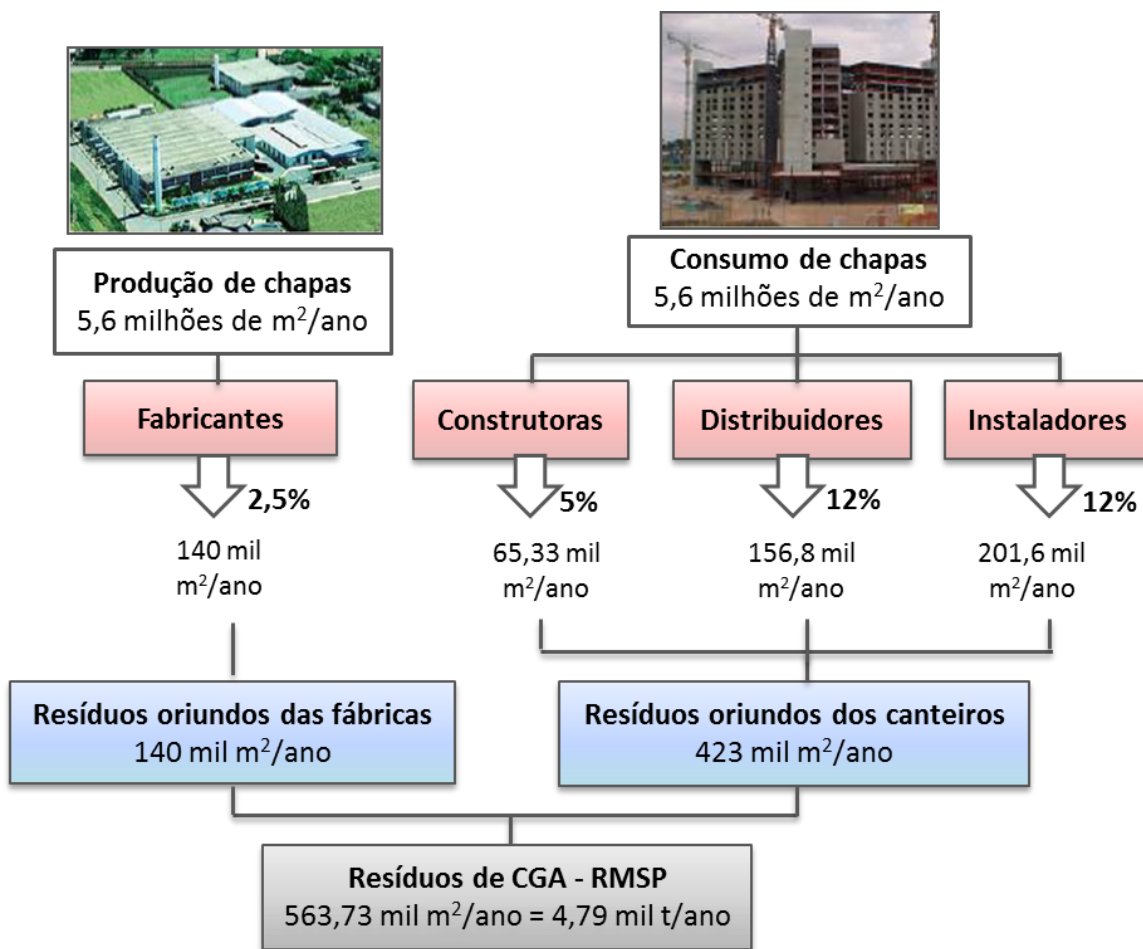


Figura 2.14 – Fluxo de resíduos de CGA na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (Adaptado de MARCONDES, 2007).

2.2.3 Reciclagem das CGA

A disposição do gesso em aterros sanitários desencadeia um problema ambiental devido a dois motivos. De acordo com Townsend *et al.* (2000) o primeiro problema está relacionado com a natureza química do gesso. Bactérias em aterros sanitários, quando em condições anaeróbicas, podem converter o sulfato (SO_4^{2-}) presente no gesso para sulfeto de hidrogênio (H_2S) - gás sulfídrico - que estando em altas concentrações se torna nocivo por ser tóxico e segundo a *Environment Agency* (2004) é também um gás inflamável.

A presença desse gás é evidenciada pelo mau-cheiro, característico de “ovo podre”. Townsend *et al.* (2001) relata que vários aterros na Flórida observam problemas de odor devido a presença de H_2S , na maioria dos casos atribuíveis aos resíduos de *drywall*. Outro motivo, comentado no trabalho de Townsend *et al.* (2001) tratou da preocupação com a contaminação do lençol subterrâneo devido à lixiviação do sulfato de cálcio presente nas CGA, evidenciando que tal problema só ocorre em casos que o aterro sanitário não dispõe de tratamento da base.

Estas razões motivaram o surgimento, em alguns países dos Estados Unidos e na Europa, de regulamentos sobre o acondicionamento dos resíduos de gesso ou até o banimento dos aterros. A Comunidade Europeia, em 2003 estabeleceu critérios e procedimentos para a admissão de resíduos em aterros, e no seu item 2.2.3 recomenda que resíduos não perigosos à base de gesso devem ser depositados nos aterros em células isoladas para que não sejam misturados aos resíduos biodegradáveis (EUROPEAN COMMUNITY, 2003).

Segundo UK (2011) os resíduos devem ser separados no próprio local que são gerados para que possam ser reciclados, reutilizados ou descartados em aterros autorizados para recebimento de gesso. Caso, o gerador de CGA queira enviar seus resíduos de gesso diretamente para a reciclagem, este gerador pode pesquisar nas *websites*, e encontrará diversos contatos de empresas de reciclagem. A alternativa de envio dos resíduos de CGA para empresas de reciclagem ocasiona a diminuição de custos para o gerador em comparação com a destinação a um aterro, devidos aos maiores valores de taxas que são cobrados.

A proibição e a instituição de regulamentos sobre critérios de admissão de resíduos, à base de gesso em aterros, impulsionaram o surgimento de várias usinas de reciclagem de *drywall* em alguns países. É o caso da empresa Canadense *New West Gypsum Recycling* (NWGR) em funcionamento desde 1985, que recebe os resíduos oriundos de *drywall*, separa os metais e outras impurezas e fornece o material para os fabricantes de *drywall*, onde é combinado com o gesso natural ou gesso sintético para fazer novas chapas.

A empresa possui mais quatro instalações em outros países: França, Reino Unido, Bélgica e EUA. Estudos realizados pela NWGR têm mostrado que na fabricação de novas chapas pode-se incluir 25% de gesso reciclado. O papel é processado posteriormente para ser utilizado em várias aplicações (NWGYPSUM, 2011).

Outra empresa que atua na transformação dos resíduos de *drywall* em matéria-prima para produção de novas CGA é a *Gypsum Recycling International* (GRI) que iniciou sua operação na Dinamarca e atualmente conta Suécia, Noruega, Holanda e EUA. Segundo Henrik (2007) o sistema de reciclagem conta com uma unidade móvel capaz de eliminar todos os tipos de contaminantes das CGA (papel, fitas, massas e outros) provenientes de novas construções ou de demolição, garantindo a qualquer fabricante de *drywall* o uso do “pó” de gesso reciclado em substituição de até 25% das matérias-primas.

A Figura 2.15 apresenta uma imagem da unidade móvel de reciclagem.



Figura 2.15 - Unidade móvel de reciclagem de resíduos do gesso (HENRIK, 2007).

A empresa *Knauf* possui estações de reciclagem de *drywall* instaladas em vários países. Primeiramente, os resíduos de gesso têm o papel removido ficando prontos para a reciclagem. Depois, o núcleo de gesso é triturado a uma granulometria adequada, prontos para a inclusão no processo de fabricação das CGA. A fábrica da *Knauf*, localizada no Reino Unido está entre a mais sofisticada da Europa. Elas são projetadas para incorporarem em sua produção, gesso reciclado, resultando em placas de boa qualidade.

A empresa, atualmente, instituiu um esquema de coleta residencial por meio de sacolas ou caixas que a própria empresa fornece, situados perto das obras ou em espaço dedicados a esta função. Cuidados são tomados para garantir que os resíduos das CGA permaneçam limpos e não contaminados com outros resíduos, uma vez que a contaminação das pode inviabilizar a reciclagem dos resíduos. Outra sacola ou caixa é usado para os resíduos de metal (perfis metálicos), que também podem ser reciclados.

Demais alternativas para a utilização de gesso reciclado, além da fabricação de novas chapas, foram descritas por Marvin (2000). O autor relata em seu trabalho que aproximadamente 1,6 milhões de casas são construídas por ano nos EUA e a maior parte dessas casas utiliza o *drywall* como subsistema de vedação interna. A construção de um lar americano, para residir uma família, em média, gera cerca de 1 tonelada de novos resíduos de *drywall*.

Nas construções residenciais e comerciais tem-se aproximadamente 64% de resíduos de *drywall*. O restante do percentual está dividido entre outras fontes: resíduos remanescentes de *drywall*, os de origem da fabricação, reforma e demolição de casas conforme apresentado na Figura 2.16.

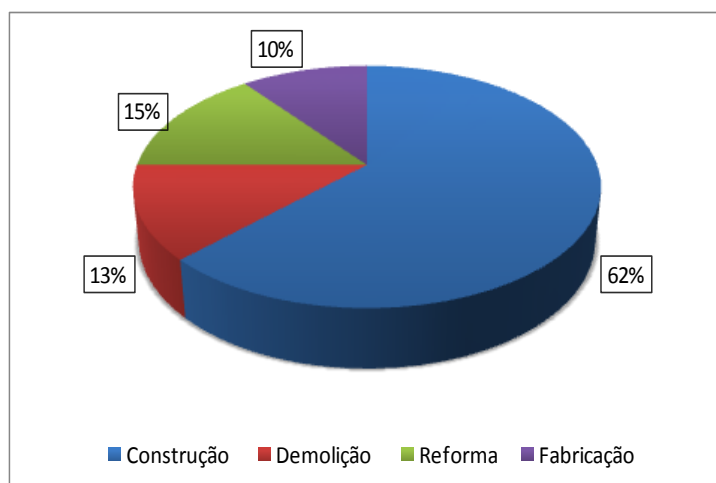


Figura 2.16 – Distribuição de resíduos de *drywall* gerados nos EUA (Adaptado de MARVIN, 2000).

Marvin (2000) ressalta ainda, que os resíduos oriundos do *drywall*, na etapa de construção, ao contrário de outras fontes de geração, podem ser mais facilmente reciclados devido aos baixos níveis de contaminação. A seguir serão apresentadas algumas das aplicações dos resíduos de *drywall* vistas no trabalho de Marvin (2000):

- **Produção de chapas de gesso acartonado:** 95% dos resíduos de *drywall* de novas construções podem ser recuperados e transformados em novas chapas. A quantidade e a pureza do gesso utilizado na fabricação tornam o reuso do material atrativo. Porém, a fim de manter a integridade da matéria-prima o papel deve ser separado do gesso. A viabilidade econômica desta forma de reciclagem do *drywall* depende muito dos custos de transporte e taxas de processamento.
- **Agente/ Aditivo para compostagem⁴:** Agentes de compostagem são utilizados para ajustar a densidade do solo, arejar as leiras de compostagem e absorver a umidade existente. O gesso obtido do *drywall* pode funcionar bem como um agente de compostagem, absorvendo o excesso de umidade e acrescentando cálcio, enxofre e carbono nas pilhas de compostagem (Figura 2.17).

⁴ Compostagem é o conjunto de técnicas aplicadas para controlar a decomposição de materiais orgânicos, com a finalidade de obter, no menor tempo possível, um material estável, rico em húmus e nutrientes minerais.



Figura 2.17 –Exemplo de compostagem (à esquerda); pilha de compostagem onde pedaços de gesso (manchas brancas) podem ser observados (TOWNSEND *et al.*, 2001).

- **Aplicação na agricultura:** o gesso de *drywall* pode ser usado como corretivo de solo, o qual aumenta o nível dos nutrientes cálcio e enxofre disponíveis e redução da acidez do solo. Em solos compactados o uso do gesso proporciona o crescimento de raízes - essas melhorias são resultado da capacidade do gesso de “soltar” solos argilosos e permitir que haja a circulação do ar e da água. Outro ponto é a facilitação da entrada da água devido à impermeabilização da superfície do solo, o que reduz potencialmente a erosão (Figura 2.18).



Figura 2.18 – Tratamento do solo com gesso reciclado de CGA para plantio de repolho, alface, couve (à esquerda); mudas plantadas no solo tratado com o gesso (TOWNSEND *et al.*, 2001).

- **Produção de cimento:** O gesso é utilizado para controle de pega do cimento, entretanto, o gesso oriundo das CGA não é indicado como aditivo para cimento por causa do elevado índice de papel aderido à chapa. No entanto, se o conteúdo de papel for inferior a 1% de gesso reciclado, torna-se possível a sua inclusão no processo de produção do cimento.

- Townsend *et al.* (2001) observam que para aplicações de compostagem, a qualidade do gesso não é tão importante (tamanho da partícula, quantidade de papel), diferente de quando se deseja o uso para fins industriais, que é o caso da fabricação do cimento.
- **Lixiviação do sódio:** Danos causados ao solo próximos às estradas, devido à utilização de sal para derretimento do gelo, no inverno, podem ser reduzidos pela adição de gesso moído. O sódio reage com o enxofre, facilitando a lixiviação dos sais do solo.

Segundo John e Cincotto (2003), a reciclagem dos resíduos de gesso é tecnicamente possível, com várias aplicações. Porém, a viabilização da reciclagem em escala comercial depende de vários fatores, inclusive de características regionais:

- Preço da matéria prima natural e do transporte;
- Custo do processamento;
- Quantidade de resíduos de gesso;
- Gestão dos resíduos em canteiro;
- Preço de tratamento do resíduo.

Dentre os resíduos à base de gesso, gerados na construção civil, o gesso acartonado é o material mais propício à reciclagem devido apresentar composição padronizada, ou seja, conhecida. O que não acontece, a exemplo, com os resíduos de argamassas, que na maioria das vezes apresentam composição heterogênea, resultado da adição de aditivos ou outros componentes.

Porém, vale comentar que independente da fonte que gerou o resíduo de gesso, geralmente a reciclagem destes é inviabilizada porque na maioria das vezes, as sobras de gesso ficam misturadas com outros materiais utilizados nos canteiros de obras, tornando o produto impuro. Por isso da importância da implantação de um Plano de Gestão de Resíduos Sólidos (PGRS), onde uma das ações estabelecidas deve prever a separação dos diferentes resíduos ainda no canteiro de obras.

2.2.4 Legislação Ambiental Brasileira

Mesmo sem uma política nacional de saneamento ambiental, ou mesmo de resíduos sólidos, entrou em vigor, a partir de janeiro de 2003, a Resolução nº 307/02 de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, que dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil.

Segundo o CONAMA (2003) são considerados resíduos da construção, os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas e etc.

O Conselho também define para a construção civil, quatro classes de resíduos, que deverão ter tratamentos distintos. Até pouco tempo, o gesso ocupava a classificação “Classe C” que se refere aos resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação. Entretanto, em maio de 2011, uma resolução publicada pelo mesmo Conselho alterava a classificação do gesso, reclassificando-o como resíduo de classe B (ver Tabela 2.5).

Com o novo texto, as sobras de gesso passaram a ser consideradas recicláveis, porém o destino dos resíduos de CGA (através de informações obtidas na elaboração deste trabalho) na maioria das vezes é o aterro sanitário. Apesar da existência de relatos, por parte de fabricantes de que tais resíduos são reciclados e enviados para fábricas de cimento ou reintroduzidos no processo de produção de chapas, foi averiguado que, na experiência brasileira a prática desses procedimentos não é corrente, tendo apenas uma usina que recicla os materiais rejeitados de sua linha de produção, onde o pó gerado é misturado ao gesso para fabricação das CGA e destinado às fábricas de cimento.

Tabela 2.5 – Classificação dos resíduos de construção e suas respectivas destinações conforme resolução CONAMA nº307/2002.

CLASSE	RESÍDUO	DESTINAÇÃO
A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos, argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldados em concreto produzidas nos canteiros de obras.	Deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.
B	São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso.	Deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação.	Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.
D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção (tintas, solventes, óleos e outros) ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde, oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.	Deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Como foi dito anteriormente, normalmente o gesso é destinado aos aterros sanitários, uma conduta inadequada por parte dos geradores. Por outro lado, existem as ATT's (Área de Transbordo e Triagem para resíduos da construção civil) que configuram alternativa de destinação de resíduos. Segundo a NBR 15112 (ABNT, 2004) são áreas destinadas ao recebimento de resíduos da construção civil e resíduos volumosos, para triagem, armazenamento temporário dos materiais segregados, eventual transformação e posterior remoção para destinação adequada, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente.

Porém a ATT é uma opção cômoda para os geradores e ao mesmo tempo, desvirtua dos princípios norteadores dos sistemas de gestão de resíduos, porque favorece a contaminação do RCD no canteiro, ou seja, o resíduo que é encaminhado para ATT geralmente encontra-se misturado (contaminado) por diversos materiais, o que inviabiliza muitas aplicações dos resíduos (Marcondes e Cardoso, 2005). O ideal seria que houvesse, ainda no canteiro, a segregação dos materiais, ou seja, um processo de triagem.

Marcondes (2007) tendo realizado uma pesquisa juntos às ATT's observou que dentre as sete instaladas em São Paulo, apenas duas recebiam resíduos à base de gesso. Outro fato constatado pela autora é a ausência de destinação adequada para os resíduos de gesso triados, o que promove o aumento nos preços cobrados pela ATT's em relação ao recebimento dos resíduos. Atualmente, existem, de fato, apenas duas opções de encaminhamento desses resíduos: os aterros ou as indústrias de cimento.

Mais um dado importante revelado por Marcondes (2007) é sobre o percentual de CGA recebido por uma das ATT's investigadas; cerca de 40 t/mês de resíduos à base de gesso é recebido em São Paulo, sendo que aproximadamente 30% correspondem aos resíduos de CGA, ou seja, 12 t/mês.

Este cenário demonstra que o volume de resíduos de CGA gerado no país, já é considerável (seja de origem da produção ou de execução) e a presença desses resíduos nos aterros, configura um problema ambiental devido a produção do gás sulfídrico e em alguns casos, a contaminação do solo. Logo, a triagem e a reciclagem deste material se tornam uma prática desejável, porém ainda não corrente no país.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados e caracterizados os materiais utilizados no estudo dos CAPs modificados com gesso e na investigação de misturas asfálticas (CA) contendo fíler gesso. Para o primeiro estudo, os materiais empregados foram o fíler gesso e CAP 50/70. Enquanto que para a produção dos corpos de prova de CA foram necessários, os agregados graúdo e miúdo de origem calcária, fíler calcário, fíler gesso e CAP 50/70. Observa-se que o CAP adicionado à mistura não será o mesmo, modificado no primeiro estudo, pois optou-se por usar na produção dos corpos de prova, o ligante virgem, adicionando o fíler gesso juntamente com os agregados.

Faz parte deste capítulo também, descrever sobre os métodos de ensaio realizados para a determinação das propriedades físicas dos CAPs modificados, porém, as etapas de produção do CA (metodologia de dosagem) e os seus respectivos ensaios de caracterização mecânica, não constam neste capítulo, sendo apresentados no próximo, de forma separada, visando obter melhor distribuição do conteúdo.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Gesso (fíler)

Os resíduos de CGA foram coletados do pátio de uma indústria (a qual não será revelado o nome, respeitando a solicitação da fábrica) onde foram escolhidas chapas menos deterioradas para a utilização na pesquisa (Figura 3.1)



Figura 3.1 – Resíduos de chapa de gesso acartonado.

A partir de então, iniciou-se o processo de transformação do gesso em fíler. Ou seja, o gesso foi separado do papel cartão, moído e peneirado em peneira de n.º 200. Obtido o fíler, este foi misturado ao ligante asfáltico (CAP 50/70) nos teores 20%, 40%, 60%, 80% e 100% (em relação à massa do ligante). Posteriormente foram analisadas as propriedades físicas dos ligantes, então modificados.

As CGA são do tipo *standard*, indicadas para uso em paredes, tetos e revestimentos de áreas secas. O processo de separação entre o papel e o gesso foi feito manualmente, com o auxílio de um estilete comum, conforme apresentado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Processo de separação do gesso.

Observa-se que o objetivo da pesquisa se limitou em dar destino tecnicamente viável ao gesso, enquanto que para o papel resultante do processo da separação, não foram estudadas formas de reciclagem. Entretanto, segundo pesquisas realizadas em vários *websites* internacionais de reciclagem de gesso acartonado, o papel cartão pode ser utilizado na fabricação de forros para tetos, fibras de celulose para produtos de papel reciclado, entre outros (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Fardos de papel oriundos das CGA prontos para ser utilizados (*Drywall Recycling Services Inc, 2013*).

Após a obtenção dos pedaços de gesso, o material foi destorroado e em seguida levado ao equipamento de abrasão *Los Angeles* onde foi “triturado” e assim, passado em peneira de malha 0,075mm (nº. 200) conforme apresentado na Figura 3.4.

Na busca da definição do processo mais eficiente de trituração do gesso, que trouxesse melhor rendimento do fíler, alguns testes foram realizados . Variou-se então, o número de rotações do equipamento e o número de esferas introduzidas no tambor, mantendo-se a mesma massa de gesso no seu interior. Ao final dos testes, optou-se por utilizar 1000 rotação, com o tambor contendo 10 esferas, carregado com 2.500g de gesso. Nessas condições de operação o rendimento obtido, e o mais satisfatório foi de 18% de fíler, em relação à massa inicial colocada no equipamento.



Figura 3.4 – Processo de obtenção do fíler gesso.

3.1.2 Agregados

Os agregados minerais utilizados neste trabalho foram o pó de pedra, brita zero e brita 1, adquiridos em uma loja de material de construção, em Brasília. A escolha desses materiais foi motivada pelo uso corrente em obras de revestimentos asfálticos no Distrito Federal. A Figura 3.5 apresenta imagens dos agregados utilizados na pesquisa.

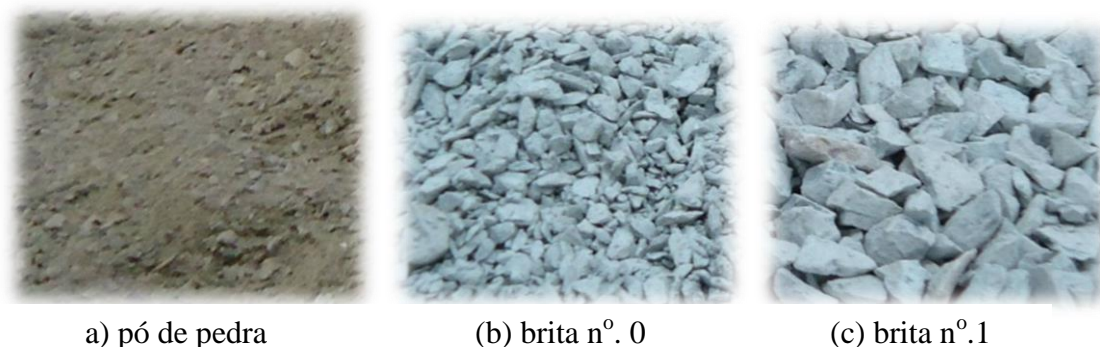


Figura 3.5 – Agregados utilizados na pesquisa.

As amostras de agregados passaram por um processo de redução, de acordo com os procedimentos descritos na norma DNER-PRO 199/96, utilizando-se separador mecânico. Após esta etapa, deu-se início à vários ensaios de caracterização dos agregados, buscando-se avaliar a adequação às exigências mínimas exigidas pelo DNIT, no que diz respeito ao uso de concretos asfálticos.

3.1.3 Ligante asfáltico (CAP 50/70)

O ligante é proveniente da refinaria da Petrobrás em Betim/MG, disponibilizados pela empresa Centro Oeste Asfaltos, localizada em Brasília, DF. O CAP se enquadra como sendo 50/70, ou seja, sua penetração está na faixa de 50 a 70 décimos de mm a uma temperatura ambiente de 25°C, e possui as seguintes características apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Especificação dos limites das características requeridas para o CAP 50/70, conforme ANP (2005) e valores determinados em laboratório, para o CAP natural.

Características	Unidades	Limites para CAP 50/70 conforme ANP (2005)	CAP natural (isento de gesso)
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	50-70	52,75
Ponto de amolecimento	°C	46	46,50
Viscosidade Brookfield (Sp 21, 20 rpm, mín.)			
a 135°C.	cP	274	385
a 150°C.	cP	112	165
a 177°C.	cP	57 - 285	60
Massa específica	g/cm ³	-	1,0038
Índice de suscetibilidade térmica	-	(-1,5) a (+0,7)	-1,99
Ponto de fulgor mín.	°C	235	325
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	60	100
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min.			
Varição em massa, máx.	% massa	0,5	0,17
Ductilidade a 25° C, mín.	cm	20	100
Aumento do ponto de amolecimento	°C	8	1,50
Penetração retida, mín.	%	55	69

A partir da Tabela 3.1 pode-se observar que o CAP utilizado se enquadra nos limites da ANP N° 19/2005, exceto o valor do Índice de suscetibilidade térmica que se encontra abaixo da faixa limite. Valores menores que (-2) indicam CAPs suscetíveis, que variam muito de consistência com a temperatura.

Ao ligante asfáltico foram adicionadas diferentes quantidades de gesso, nas seguintes proporções, em relação à massa de CAP: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. No total, foram estudadas 6 composições de ligante, contando com a composição de CAP natural, conforme apresentado na Tabela 3.2. Para serem realizados todos os ensaios das propriedades do CAP, foram tomados 300 g de material, acondicionados em latas para posterior realização dos ensaios (Figura 3.6).

Tabela 3.2 – Composições de ligantes asfálticos utilizados na pesquisa.

Sigla	Composição	Proporção CAP: gesso
CAP 100%	300g de CAP + 300g de gesso	1/1
CAP 80%	300g de CAP + 240g de gesso	1/0,8
CAP 60%	300g de CAP + 180g de gesso	1/0,6
CAP 40%	300g de CAP + 120g de gesso	1/0,4
CAP 20%	300g de CAP + 60g de gesso	1/0,2
CAP 0%	300g de CAP	1/0



Figura 3.6 – Acondicionamento dos ligantes em latas.

O processo de mistura do gesso ao ligante foi realizada com o auxílio de um agitador mecânico, da marca Fisatom 713 D, na velocidade de 600 rpm, por um período de 30 minutos. Para o aquecimento do material, utilizou-se uma manta aquecedora forrada com papel alumínio para manter o recipiente metálico aquecido uniformemente nas temperaturas entre 160 °C a 165 °C.

Dentro do recipiente metálico foram inseridas as latas que serviram de recipientes para os ligantes a serem modificados. O gesso foi sendo misturado ao ligante em pequenas porções para garantir uma mistura mais homogênea (Figura 3.7).



Figura 3.7 – Processo de mistura do gesso ao CAP.

A temperatura de mistura foi definida por meio de testes visuais (na temperatura escolhida o gesso se misturava facilmente ao ligante) e com base na recomendação descrita na DNIT EM 095/2006, que orienta a não utilização do CAP a temperaturas acima de 177°C. Quando o CAP é aquecido nestas condições, perde óleos voláteis incorporando moléculas de oxigênio proporcionando um aumento na consistência original (oxidação e endurecimento).

Vale comentar que o período de mistura fixado em 30 minutos, foi determinado com base em testes empíricos, quando com o uso da espátula eram feitos movimentos rotatórios e retiradas de amostras, observando-se a ausência de grumos na mistura.

3.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

3.2.1 Ensaio para a determinação das propriedades dos agregados e fíler

Os ensaios básicos de caracterização dos agregados foram desenvolvidos no Laboratório de Engenharia Rodoviária – LER/CEFTRU/UnB. Em relação ao fíler gesso, outros ensaios complementares também foram realizados, tais como de análise química e mineralógica, análise térmica, determinação da carga elétrica superficial e determinação da expansão do gesso. Estes contaram com o apoio de outros laboratórios e serão citados ao longo do texto. A Figura 3.8 apresenta o fluxograma contendo todos os ensaios desta etapa.

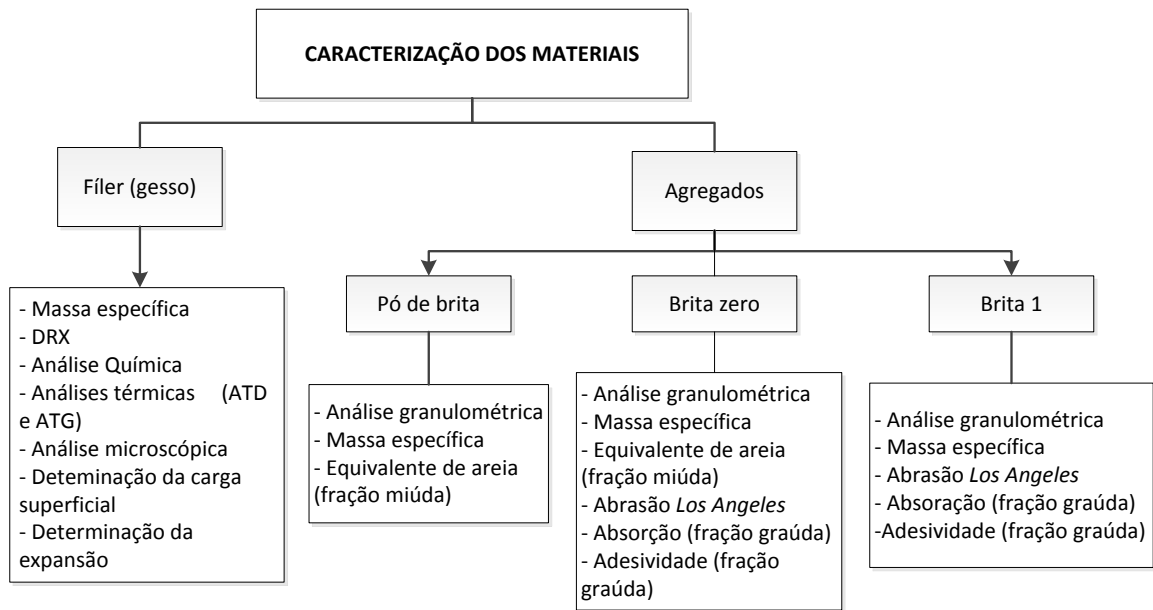


Figura 3.8 – Fluxograma de ensaios realizados na etapa de caracterização dos agregados e fíler gesso.

3.2.1.1 Análise granulométrica dos agregados e do gesso (DNER-ME 083/98)

A análise granulométrica é o processo que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a percentagem em peso que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise. Trata-se de um ensaio fundamental que dará subsídio para vários ensaios utilizados nesta pesquisa. A norma DNER-ME 083/98 descreve os procedimentos deste ensaio.

Para o pó de brita, brita zero e a brita 1, utilizou-se o peneiramento mecânico com a série de peneiras já definidas pela faixa C do DNIT, enquanto que, para o gesso, a determinação da granulometria foi realizada por meio do equipamento granulômetro a *laser* (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Agitador de peneiras mecânico (à esquerda) e granulômetro a *laser*.

3.2.1.2 Determinação da massa específica e absorção dos agregados

A massa específica dos agregados é essencial para o cálculo dos parâmetros volumétricos da mistura asfáltica (tais parâmetros serão vistos no decorrer do trabalho), por isso deve ser determinada.

Outra propriedade física importante é a medida da absorção do agregado, ou seja, a quantidade de ligante que um agregado pode vir a absorver na mistura asfáltica. Este consumo é verificado de forma indireta, pelo ensaio de absorção de água, pois a absorção da água está relacionada com a porosidade do agregado, ou seja, quanto maior a absorção de água, significa que o agregado é mais poroso e conseqüentemente irá absorver mais ligante asfáltico (ligante este necessário para dar coesão à mistura asfáltica) o que levaria à incorporação de uma quantidade adicional de ligante, segundo Bernucci *et al.* (2006).

Em relação ao agregado graúdo (material retido na peneira n^o.4) foram realizados ensaios segundo o método descrito pela NBR NM 53:2009 (semelhante ao procedimento descrito na norma DNER-ME 081/98) para a obtenção da massa específica real (G_{sa}), da massa específica aparente (G_{sb}) e da absorção. Para tal, são feitas três determinações de massa: massa na condição saturada com superfície seca (m_s), massa imersa em água (m_a) e massa seca (m). A seqüência de execução do ensaio pode ser observada na Figura 3.10.

Com os resultados destas determinações, calcula-se a massa específica real (G_{sa}) e a massa específica aparente, conforme as Equações 3.1 e 3.2, respectivamente.

$$G_{sa} = \frac{m}{m - m_a} \quad (3.1)$$

$$G_{sb} = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (3.2)$$

Para a determinação da absorção utiliza-se a Equação 3.4:

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (3.3)$$



Figura 3.10 – Sequência de procedimentos para o ensaio de determinação das massas específica real e aparente e absorção do agregado graúdo.

Faz-se necessário uma explicação sobre a massa específica real e a aparente. A massa específica real (g/cm^3) é a relação entre a massa seca e o volume real que representa o volume dos sólidos, desconsiderando o volume de quaisquer poros na sua superfície. Esse parâmetro considera somente o volume da partícula dos agregados. Não inclui o volume de quaisquer poros ou capilares que são preenchidos pela água após imersão por 24 horas (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

A massa específica aparente (g/cm^3) é determinada quando se considera o material como um todo (forma aparente) sem descontar os vazios. É determinada dividindo-se a massa seca pelo volume aparente do agregado, que inclui o volume de agregado sólido mais o volume dos poros superficiais contendo água. Para isso, a superfície do agregado deve estar saturada e posteriormente, faz-se a remoção dessa água superficial cuidadosamente, com o uso de um tecido absorvente, conforme foi visto.

No caso dos agregados miúdos (material passante na peneira de n.º 4 e que fica retido na peneira de n.º 200), foi executado o método de ensaio DNER-ME 194/98 – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de *Chapman*. 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^3 , o procedimento de ensaio é ilustrado na Figura 3.11.



Figura 3.11– Frasco *Chapman* contendo o agregado miúdo.

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:

ρ = massa específica real do agregado miúdo

L = leitura do frasco

Vale ressaltar que este método não permite determinar a massa específica aparente e a absorção de água do agregado miúdo. No entanto, por meio das normas ASTM C 127 e AASHTO T 85 é possível calcular as massas específicas real e aparente e ainda, a absorção dos agregados miúdos.

Para a determinação da massa específica real do fíler que compõem os agregados e do fíler gesso a ser utilizado como agente modificador do CAP, adotou-se o método de ensaio DNER-ME 085/94. Neste, utiliza-se um frasco graduado denominado de frasco *Le Chatelier*.

Coloca-se querosene no frasco, em quantidade tal que seu nível superior fique entre as graduações 0 e 1. Após este procedimento, o frasco é levado a um banho d'água até constância da temperatura do banho e o líquido no interior do frasco. Após equilíbrio da temperatura, registra-se a primeira leitura do nível superior do líquido.

Retira-se o frasco do banho e coloca-se em pequenas porções cerca de 60g do material. A seguir o frasco é colocado novamente no banho e após equilíbrio, faz-se a leitura final do nível superior do líquido. A diferença das leituras inicial e final representa o volume do líquido deslocado pelo material. Logo, a massa específica real do fíler (ρ) é determinada por meio da Equação 3.5.

$$\rho = \frac{\text{massa do material}}{\text{volume do líquido deslocado}} \quad (3.5)$$

A Figura 3.12 apresenta os registros fotográficos da sequência dos procedimentos de ensaio para os dois materiais.



Figura 3.12 – Sequência de procedimentos para a determinação da massa específica real dos fíleres gesso e calcário.

3.2.1.3 Ensaio de Equivalente de areia (DNER-ME 054/97)

Para o agregado miúdo, deve-se determinar o chamado equivalente de areia que representa a proporção relativa de materiais do tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos. Este ensaio é descrito pela norma DNER-ME 054/97.

Neste ensaio, uma amostra de agregado com tamanhos de partículas menores do que 4,8mm é colocada em uma proveta contendo uma solução de cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído e mantida em repouso por 20 minutos. Em seguida, o conjunto é agitado por 30 segundos, e após completar a proveta com a solução até um nível pré-determinado, deixado em repouso por mais 20 minutos. Após este período, é determinada a altura de material floculado em suspensão (suspensão argilosa) (h_1). Com um bastão padronizado que é introduzido na proveta, é determinada a altura de agregado (fração areia) depositado por sedimentação (h_2).

Logo, o equivalente de areia é determinado pela expressão 3.6:

$$EA = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (3.6)$$

Para que um agregado possa ser utilizado em concreto asfáltico, o equivalente de areia deve ser de pelo menos 55%. A Figura 3.13 apresenta a sequência do ensaio.



Figura 3.13 – Sequência de procedimentos para o ensaio que determina o equivalente de areia do agregado miúdo.

3.2.1.4 Determinação do desgaste à abrasão (DNER-ME 035/98)

Durante o processo de manuseio e execução de revestimentos asfálticos os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão, e durante a ação do tráfego ocorre abrasão também. Desta forma, os agregados devem resistir a tais quebras, degradação e desintegração.

O ensaio comumente utilizado para medir a resistência à abrasão é o ensaio de abrasão *Los Angeles*. Neste ensaio, uma amostra de agregado (m_i) é submetida a 500 ou 1000 revoluções no interior do equipamento específico para o ensaio. Um número variado de esferas de aço, conforme a granulometria da amostra, é adicionado no cilindro, induzindo impactos nas partículas durante suas revoluções.

O resultado é dado pela redução de massa dos agregados retidos na peneira n°. 12 (1,7mm) em relação à massa inicial da amostra especificada (Equação 3.7).

$$LA = m_i \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (3.7)$$

A Figura 3.14 apresenta o equipamento com o material após o processo de abrasão, a redução da amostra em peneira n°.12 e a amostra retida na peneira n°.12 sendo lavada para posterior secagem e determinação da massa após o abrasão.



Figura 3.14 – Material após ensaio de abrasão, redução da massa de amostra retida na peneira n°.12 e posterior lavagem para a determinação da massa após o abrasão.

Para concreto betuminoso, segundo a DNER-ES 313/97, é desejável um desgaste *Los Angeles* igual ou inferior a 40%, admitindo-se agregados com valores maiores no caso de terem apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior.

3.2.1.5 Determinação do índice de forma (DNER-ME 086 /94)

A forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento na misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade. Partículas irregulares ou de forma angular tais como pedra britada, cascalho e algumas areias de brita, tendem a apresentar melhor intertravamento entre os grãos compactados, tanto maior quanto mais cúbicas forem as partículas e mais afiladas forem suas arestas.

O ensaio que determina as formas das partículas é o chamado índice de forma (f) . Esse índice varia de 0 a 1,0. Se o agregado obtiver $f = 1,0$ isto indica ótima cubicidade e se $f = 0,0$ o agregado é considerado lamelar. O limite mínimo de aceitação adotado para o agregado quanto a forma é de $f = 0,5$. O método de ensaio é normalizado pela norma DNER – ME 086/94.

Após ter sido determinada a granulometria do material, seleciona-se a graduação na qual ele se enquadra, sendo no caso as graduações C e D para a brita 1 e brita zero, respectivamente (ver Tabela 3.3). A seguir separam-se as frações que constituirão a amostra por meio de crivos de abertura circular. De cada fração selecionada, separam-se as partículas retidas no primeiro crivo redutor (crivo I) que devem ser testadas em um segundo crivo redutor (crivoII), anotando-se o peso retido em cada crivo redutor (Figura 3.15).

Tabela 3.3 – Determinação da graduação do material após análise granulométrica, segundo DNER-ME 086/94.

Graduação	Crivos de abertura circular (mm)		Pesos das frações da amostra (g)	Crivos redutores correspondentes (mm)**	
	Passando*	Retido		Crivo I	CrivoII
A	76,0	63,5	3000	38,0	25,0
	63,5	50,0	3000	32,0	21,0
	50,0	38,0	3000	25,0	17,0
	38,0	32,0	3000	19,0	12,7
B	32,0	25,0	2000	16,0	10,5
	25,0	19,0	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



Figura 3.15 – Crivo de abertura circular utilizado para seleção das frações do material (esquerda) e crivo redutor.

O índice de forma é calculado pela Equação 3.8.

$$f = \frac{P1+0,5P2}{100 \times n} \quad (3.8)$$

Onde:

f = índice de forma

P1 e P2 = soma das percentagens retidas nos crivos 1 e 2 respectivamente, de todas as frações que compõem a graduação

n = número de frações que compõem a graduação escolhida

A forma das partículas pode ainda ser caracterizada segundo a norma ABNT NBR 6954/1989, onde são medidas por meio de um paquímetro três dimensões das partículas: comprimento, largura e espessura. Para a classificação, são determinadas e relacionadas entre si razões entre largura e comprimento e espessura e largura.

3.2.1.6 Avaliação da durabilidade dos agregados pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio (DNER-ME 089/94)

Alguns agregados que inicialmente apresentam boas características de resistência podem sofrer processos de desintegração química quando expostos às condições ambientais no pavimento, a exemplo de alguns basaltos suscetíveis à deterioração química com a formação de argilas (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A norma do DNER – ME 089/94 descreve o ensaio de durabilidade do agregado, onde frações do agregado são imersas em uma solução saturada de sulfato de sódio ou de magnésio por um período de 16 a 18 horas, à temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.16), seguidos de secagem em estufa. Este procedimento foi realizado em cinco ciclos. Ao final os cinco ciclos, quantificou-se a perda de massa das frações ensaiadas e observou-se visualmente o efeito da ação da solução do sulfato de magnésio que foi utilizada. De acordo com Bernucci *et al.* (2006) a perda de massa resultante desse ataque químico, deve ser no máximo de 12 %.



Figura 3.16 – Frações do agregado imersas na solução de sulfato de magnésio; vista de cima do agregado imerso na solução.

3.2.1.7 Adesividade do agregado graúdo ao ligante (DNER- ME 078/94)

Em misturas asfálticas, a perda de adesão entre agregado e ligante está comumente relacionada a três fatores: a incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do material betuminoso, a ocorrência de umidade e a presença de sujeira e finos na superfície do agregado (LYTTON, 2004).

Segundo o mesmo autor, essa perda de adesão do ligante asfáltico com a superfície do agregado (fratura adesiva) bem como a fratura do próprio filme de ligante (fratura coesiva), quer seja na presença de água ou não, é a origem de muitos tipos de defeitos em pavimentos, incluindo trincamento por fadiga, deformação permanente e dano por umidade.

Neste sentido, a ABNT (1994) define que a adesividade de agregado a material betuminoso é a propriedade que tem o agregado de ser aderido por material betuminoso, sendo verificada pelo não deslocamento da película betuminosa que recobre o agregado.

Logo, para a avaliação da adesividade do agregado ao ligante, utilizou-se o ensaio descrito pelo DNER–ME 078/94, onde a mistura não compactada é imersa em água a uma temperatura de 40°C, sob a ação de água destilada, durante 72h. Ao final deste período, as partículas cobertas pelo ligante são avaliadas visualmente, observando se houve ou não o deslocamento da película do ligante.

Existem outros métodos de ensaios utilizados, mas que não farão parte desta campanha de ensaios, são os normalizados pelas ASTM D 1075 e AASHTO T283.

A Figura 3.17 apresenta dois procedimentos necessários para a análise da adesividade conforme DNER-ME 078/94; a preparação da mistura CAP-agregado e posterior imersão das amostras em água para permanência em estufa.



Figura 3.17– Mistura do CAP ao agregado e amostras imersas e água destilada para posterior permanência em estufa.

3.2.1.8 Análise mineralógica dos agregados

A composição mineralógica da brita zero e brita 1 foi identificada por difração de raios-X (DRX) no Laboratório de Raios-X do Instituto de Geociências da UnB, utilizando-se um equipamento RIGAKU D/MAX – 2/C operando com tubo de cobre, sob voltagem de 35 kv e 15 mA, velocidade de varredura de 2°/minuto, no intervalo de 2° a 80° - 2 θ

(para as amostras total e fração argila) e de 2° a $40^\circ - 2\theta$ teta (para as amostras solvatadas com etileno glicol e aquecida).

Essa análise consistiu em quatro varreduras distintas: uma da amostra total e três da fração argila: orientada e seca ao ar, solvatada em etileno glicol e aquecida. A amostra total foi destorroada. Fez-se então a montagem em lâminas de alumínio vazadas.

A separação da fração argila foi realizada por dispersão em água, utilizando-se 15 g da amostra destorroada. Para aumentar a velocidade de sedimentação da amostra foi centrifugada sob 750 rpm, durante 7 min. Frações maiores que da argila decantaram enquanto esta, permaneceu em suspensão. Este material suspenso foi submetido à centrifugação a 1500 rpm, por 30 minutos, sendo utilizado na preparação de uma lâmina com amostra orientada. Após a secagem da lâmina, foi realizada a solvatação com etileno-glicol por cerca de 12 horas, favorecendo a entrada do composto nos espaços intercamada dos minerais expansivos, permitindo a verificação do possível aumento das distâncias interplanares.

Por fim, a lâmina foi submetida ao aquecimento de 490°C em mufla, por 3h30. Após este tempo, procedeu-se à análise da amostra para a verificação das mudanças da posição dos picos, pela perda do material do sítio intercamada, ou o colapso da estrutura de alguns minerais. As interpretações dos difratogramas e identificações dos minerais foram feitas utilizando-se o *software* JADE 3.0 para *Windows*, *XRD Pattern Processing for the PC*, 1991-1995 *Materials Data*, Inc..

3.2.1.9 Análises química e mineralógica do gesso

A análise química do gesso foi realizada no laboratório de Geoquímica da UnB, com base na metodologia própria, utilizando os aparelhos de espectrômetro de absorção atômica da marca *Perkin Elmer*, modelo 603, e um espectrômetro de emissão atômica com fonte de plasma da marca *Spectro Analytical Instruments GmbH*, modelo Spectroflame-Fvmo3, utilizando nebulizador Meinhard e demais condições operacionais de acordo com as especificações do fabricante.

A composição mineralógica do gesso foi determinada também por meio de ensaio de DR-X, descrito no item 3.2.1.8.

3.2.1.10 Análises Térmicas - Análise Termodiferencial (TD) e Análise Termogravimétrica (ATG) do fíler gesso

As análises termogravimétrica (ATG) e termodiferencial (ATD) são necessárias para indicar as faixas de temperaturas onde ocorrem as perdas de massas e as temperaturas em que ocorrem transformações endotérmicas e exotérmicas dos materiais.

As curvas térmicas foram obtidas através de um sistema de Análises Térmicas Modelo RB-3000 da BP Engenharia, com aquecimento de 12,5°C/min, conforme apresentado na Figura 3.18. A temperatura máxima para ambos os casos foi de 800 °C e o padrão utilizado na ATD foi óxido de alumínio (Al₂O₃) calcinado. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).



Figura 3.18 – Analisador térmico RB 3000.

3.2.1.11 Análise microscópica do fíler gesso

O gesso oriundo das CGA utilizadas nesta pesquisa apresentam fibras de vidro em sua composição. Deste modo, para constatar a presença deste material e avaliar as suas características (comprimento e espessura) procedeu-se a uma análise visual do gesso já transformado em fíler, (material passante na peneira de n^o. 200) utilizando microscópio digital, da marca *USB Microscope High Resolution*, com 200 vezes de aumento (Figura 3.19).



Figura 3.19 – Observação de uma amostra de gesso com o auxílio de microscópio digital, onde é percebida a presença de fibras de vidro.

Ressalta-se que não foi possível obter maiores informações relacionadas às fibras junto ao fabricante (quantidade de fibras por m^2 , tamanho, composição das fibras, etc.), devido aos mesmos alegarem que a divulgação dos referidos dados comprometeriam o “segredo industrial” do produto.

Sendo assim, buscaram-se alternativas para a identificação das características das fibras, por meio, por exemplo, de métodos de diluição, junto ao Instituto de Química (UnB), na tentativa de isolar somente as fibras do gesso e proceder sua análise. Entretanto, tais experimentos não foram capazes de separar esse material, limitando o estudo das análises da influência das fibras no ligante e no CA.

3.2.1.12 Determinação da carga superficial do fíler gesso

De acordo com Bernucci *et al.*, (2006) os minerais nas partículas de agregados apresentam seus átomos dispostos em uma rede cristalina, onde os átomos da superfície exercem atração sobre átomos de gases, líquidos ou sólidos que com ela tenham contato, promovendo a adsorção química. Essa adsorção é o principal fator na adesividade entre o agregado e os ligantes asfálticos.

Neste sentido conhecer a carga superficial do gesso em estudo torna-se uma informação importante, quando da análise de sua influência no desempenho da adesividade ligante-agregado. A exemplo, o fíler “desejado” deve ser, caso o agregado apresente cargas eletronegativas, inerte e eletropositivo.

Estas características conduzem a uma boa adesividade entre os dois materiais. A Figura 3.20 ilustra a imagem do esqueleto sólido do CA, onde pode ser observado o agregado envolto pelo filme de ligante contendo fíler ativo (mástique) e ao redor o fíler agregado, assim também como a representação das cargas elétricas do agregado mineral.

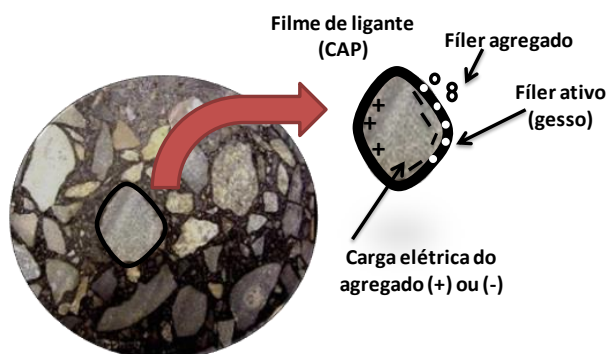


Figura 3.20 – Composição do esqueleto sólido do corpo de prova de CA.

A metodologia utilizada para determinar a carga superficial do gesso foi proposta por Van Raij e Peech (1972) denominada de titulação potenciométrica. O método se caracteriza por computar as cargas variáveis dos solos, permitindo determinar o valor no qual essas cargas se anulam, ou seja, o ponto de carga zero (PCZ). Este ponto é obtido pela interseção de curvas originadas da titulação sob diferentes concentrações eletrolíticas, representa um valor de pH no qual a carga não varia com alterações na concentração salina.

As amostras de gesso (1,5 g) foram diluídas em 15 ml de soluções de 0,1, 0,01 e 0,0001 M KCL, e o pH ajustado a um intervalo entre 3 e 8, com o uso de soluções de HCL (ácido) ou KOH (base). As suspensões foram mantidas a temperatura ambiente de $24 \pm 2^\circ\text{C}$, em frascos plásticos recobertos por 20 mL ao longo de 3 dias. A cada dia, as suspensões eram agitadas duas vezes, uma no período da manhã e outra vez, no período da tarde.

Após os 3 dias, os valores de pH dos sobrenadantes foram registrados com o auxílio de um pHmetro. Os valores de H^+ e OH^- adsorvidos pelas amostras de solo foram estimados a partir da quantidade de ácido ou base necessária para levar as amostras para o equilíbrio final do pH. Com tais resultados foram construídas curvas com os valores dos pHs estabilizados.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geoquímica da UnB. A Figura 3.21, apresenta imagens do titulador e das amostras de gesso em repouso.



Figura 3.21 – Titulador utilizado para o ensaio de determinação de carga superficial do gesso e amostras em repouso.

3.2.1.13 Determinação da expansão do fíler gesso

De acordo com a composição do gesso acartonado (Tabela 2.3) verificou-se a necessidade de verificar, mesmo após hidratado, se o fíler apresentaria algum comportamento expansivo, uma vez que, contém em sua composição a presença de vermiculita, além de outras substâncias desconhecidas.

A vermiculita, $(Mg, Fe)_3 [(Si, Al)_4 O_{10}] [OH]_2 4H_2O$, é um silicato hidratado de magnésio, alumínio e ferro. A camada de moléculas de água, que intercala as camadas de alumínio e silício na estrutura do mineral, quando aquecidas de forma rápida, a temperaturas elevadas, transforma-se em correntes de ar quente e causa aumento no volume do mineral. Esse processo de expansão térmica confere ao produto final múltiplas aplicações industriais. Na forma expandida, a vermiculita é quimicamente ativa, biologicamente inerte, além de possuir baixa densidade (UGART *et al.*, 2005).

Em busca de obter indicativos de expansão do fíler gesso, procedeu-se à determinação da variação da altura (h) de uma amostra de gesso, moldada em um anel imerso em água, por um período de 24h. As medidas da variação da altura foram feitas com o auxílio de um deflectômetro que media o deslocamento no sentido vertical, conforme apresentado na Figura 3.22. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da UnB.

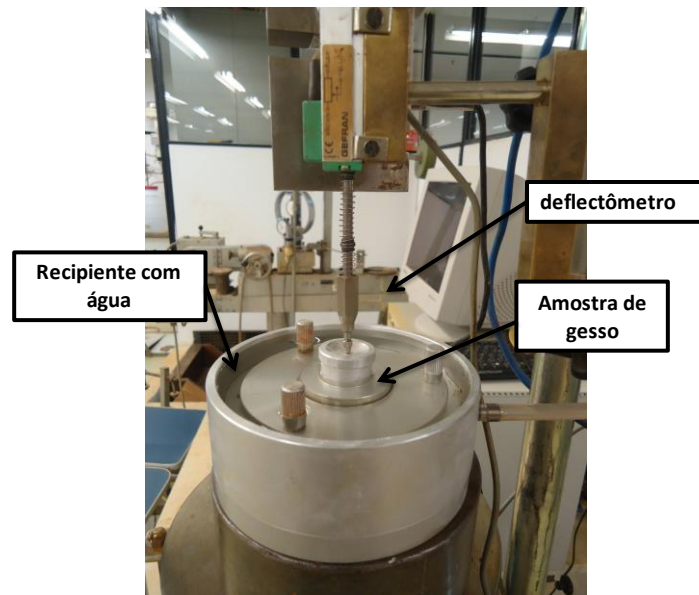


Figura 3.22 – Esquema de ensaio para determinação da variação longitudinal da amostra de gesso.

3.2.2 Ensaio para determinação das propriedades físicas dos ligantes

Os ensaios para a determinação das propriedades físicas dos ligantes natural e modificados foram realizados no Laboratório de Engenharia Rodoviária – LER/CEFTRU/UnB. A Figura 3.23 apresenta o fluxograma listando os ensaios desta etapa.

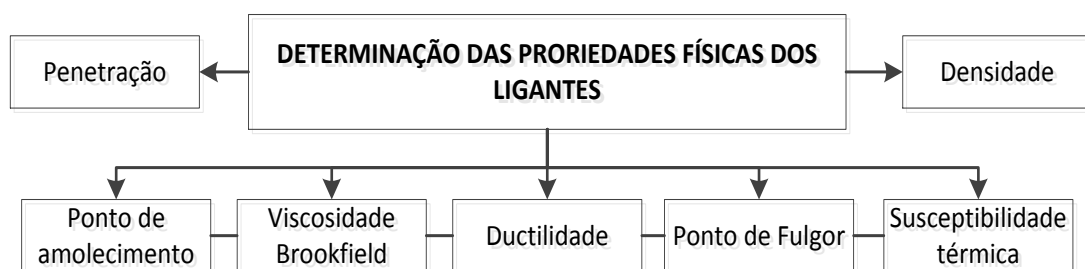


Figura 3.23 – Fluxograma dos ensaios para a determinação das propriedades dos ligantes.

3.2.2.1 Determinação da penetração (ABNT NBR 6576:2007)

Segundo Bernucci *et al.* (2006) a penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado, por cinco segundos, a uma temperatura de 25°C (Figura 3.24). Em outras palavras, a penetração mede a dureza do ligante. Tal característica é utilizada para classificar os vários tipos de cimentos asfálticos no Brasil.

Foram feitas cinco leituras de penetração para cada teor estudado, assumindo-se como resultado a média obtida, de no mínimo três penetrações cujos valores não se afastaram mais do que duas unidades do valor máximo e do valor mais baixo encontrado. O ensaio foi realizado em amostras antes e após o processo de envelhecimento na estufa RTFOT (o ensaio de envelhecimento será explicado no decorrer do trabalho).



Figura 3.24 – Equipamento utilizado no ensaio de penetração. Detalhe da agulha ao penetrar a amostra.

3.2.2.2. Ensaio de ponto de amolecimento - Método do anel e bola (ABNT NBR 6560:2008)

O ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido (sob certas condições particulares) e atinge uma determinada condição de escoamento. Este ensaio é classificatório, em especificações brasileira e europeia, e é empregado para estimativa de suscetibilidade térmica, além também de estar presente em especificações de asfaltos modificados e asfaltos soprados (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Neste ensaio, duas amostras de ligante são moldadas em dois anéis padronizados (Figura 3.25). Após o resfriamento das amostras, os dois anéis são colocados em um suporte e acima de cada anel são posicionadas esferas padronizadas. No suporte também é inserido um termômetro. O conjunto é colocado dentro de um béquer com água e submetido ao aquecimento numa taxa constante.

A partir de determinada temperatura, ocorre o amolecimento das amostras dentro dos anéis que cedem devido ao peso das esferas, sendo lidas as temperaturas no instante em que cada esfera toca uma placa de referência, conforme Figura 3.26. O ensaio foi feito em amostras antes e após o ensaio de envelhecimento (RTFOT).



Figura 3.25 – Exemplo de anéis moldados para a determinação do PA.

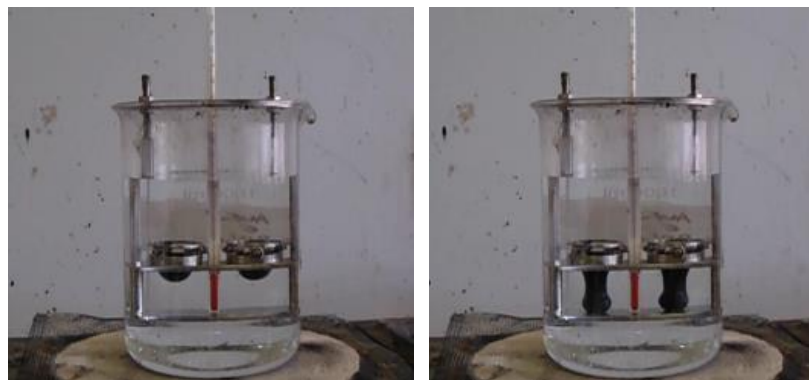


Figura 3.26 – Primeiros instantes do ensaio (à esquerda) e término do ensaio onde é observado que as esferas tocam a placa de referência.

3.2.2.3 Índice de Suscetibilidade Térmica (IST)

A suscetibilidade térmica indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura. Trata-se de uma propriedade importante dos ligantes asfálticos uma vez que se eles forem muito suscetíveis à variação de estado ou de propriedades frente à variação de temperatura, não serão desejáveis na pavimentação. É desejável que o ligante asfáltico apresente variações pequenas de propriedades mecânicas, nas temperaturas de serviço dos revestimentos, para evitar grandes alterações de comportamento frente à variações de temperatura ambiente (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Alguns métodos já foram propostos para se calcular o IST, no entanto, o mais conhecido é o procedimento proposto por Pfeiffer e Van Doormaal, em 1936, o qual relaciona o ponto de amolecimento do CAP e sua penetração a 25 °C (Equação 3.9).

$$IST = \frac{500\log(PEN) + 20(PA) - 1951}{120 - 50\log(PEN) + (PA)} \quad (3.9)$$

Onde:

PEN = valor da penetração do CAP a 25°C, em mm

PA = valor da temperatura do ponto de amolecimento do CAP, em °C

Contudo esta equação é interpretada por alguns pesquisadores como um cálculo totalmente empírico, apesar de ser bastante utilizado. Por isso, outro parâmetro de avaliação da suscetibilidade térmica de ligantes pode ser utilizado. Trata-se da análise da inclinação da curva do gráfico viscosidade *versus* temperatura, o qual fornece um bom indicativo do quanto suscetível é determinado ligante.

3.2.2.4 Ponto de fulgor e Ponto de combustão (ABNT NBR 11341:2008)

Este ensaio é categorizado como um ensaio ligado a segurança de manuseio do asfalto, durante o transporte, estocagem e usinagem. Representa a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material asfáltico se inflama por contato com uma chama (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Segundo a ABNT NBR 11341:2008 o ponto de fulgor é uma medida da tendência da amostra a formar uma mistura inflamável com o ar sob condições laboratoriais controladas. É apenas uma entre outras propriedades que devem ser consideradas na avaliação completa o perigo de inflamabilidade do material. Acima da temperatura ponto de fulgor, também é determinado o ponto de combustão, que é uma medida da tendência da amostra em manter a combustão. Aproximadamente, 70 ml de amostra são adicionadas a uma cuba de ensaio que é levada ao aquecimento, e mantém-se sob à superfície do ligante uma chama, com movimentos de vai e vem (Figura 3.27).

A temperatura da amostra é aumentada rapidamente no início, e depois a uma taxa mais lenta e constante, quando o ponto de fulgor estiver próximo. O ponto de fulgor é identificado quando uma chama larga aparece e se propaga em toda a superfície da amostra e se extingue instantaneamente.

Para a determinação do ponto de combustão, dá-se continuidade ao aquecimento da amostra após anotar o ponto de fulgor. Quando a amostra entra em combustão e sustenta a queima por pelo menos 5s registra-se a temperatura neste momento, determinando-se o ponto de combustão.

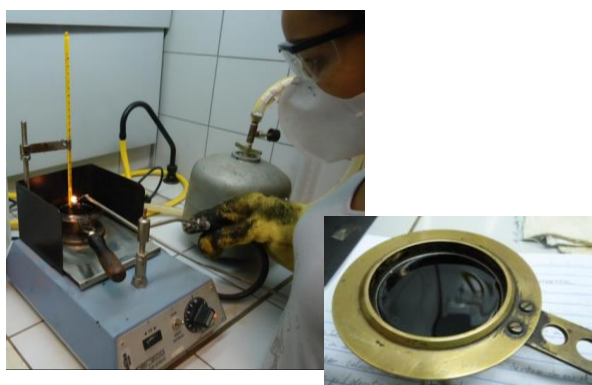


Figura 3.27 – Ensaio em andamento para determinação do PF e PC e recipiente padrão utilizado para o ensaio.

3.2.2.5 Determinação da Ductilidade (ABNT NBR 6293:2001)

A ductilidade é uma medida empírica que permite avaliar, mesmo que de forma indireta, a coesão dos asfaltos. Na prática, a ductilidade é a capacidade do material de se alongar na forma de um filamento.

O método de ensaio para a determinação da ductilidade foi realizado conforme os procedimentos prescritos pela ABNT NBR 6293:2001, no qual as amostras, após resfriamento à temperatura ambiente, são submetidas à tração no ductilômetro que contém um banho d'água.

O ensaio é finalizado quando se observa a ruptura da amostra, anotando-se a distância (em centímetros) que as garras do ductilômetro se deslocaram para produzir a referida ruptura. O resultado considerado para cada teor de ligante foi o resultante de uma média de três amostras. A Figura 3.28 apresenta as etapas do ensaio.

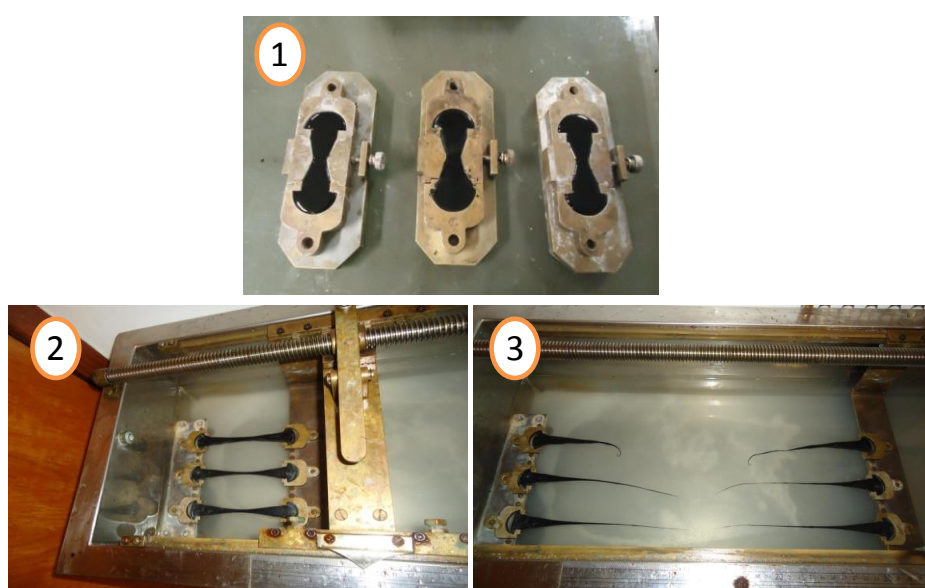


Figura 3.28 – Etapas do ensaio para a determinação da ductilidade do ligante asfáltico.

3.2.2.6 Densidade relativa do ligante (ABNT NBR 6296:2004)

A densidade relativa é a razão da massa de um dado volume do material, pela massa de igual volume de água à mesma temperatura. Em resumo, primeiramente, procede-se à calibração do picnômetro a ser utilizado, ou seja, determina-se a massa do picnômetro vazio (A) e depois a massa do picnômetro cheio de água destilada (B).

A amostra de ligante aquecida à 110°C é vertida no picnômetro em questão em quantidade suficiente para preencher $\frac{3}{4}$ de sua capacidade. Após o resfriamento, determina-se o peso do picnômetro mais a amostra (C).

Por fim, completa-se o volume restante do picnômetro com água destilada e registra-se a sua massa (D). A sequência do ensaio é apresentada na Figura 3.29.

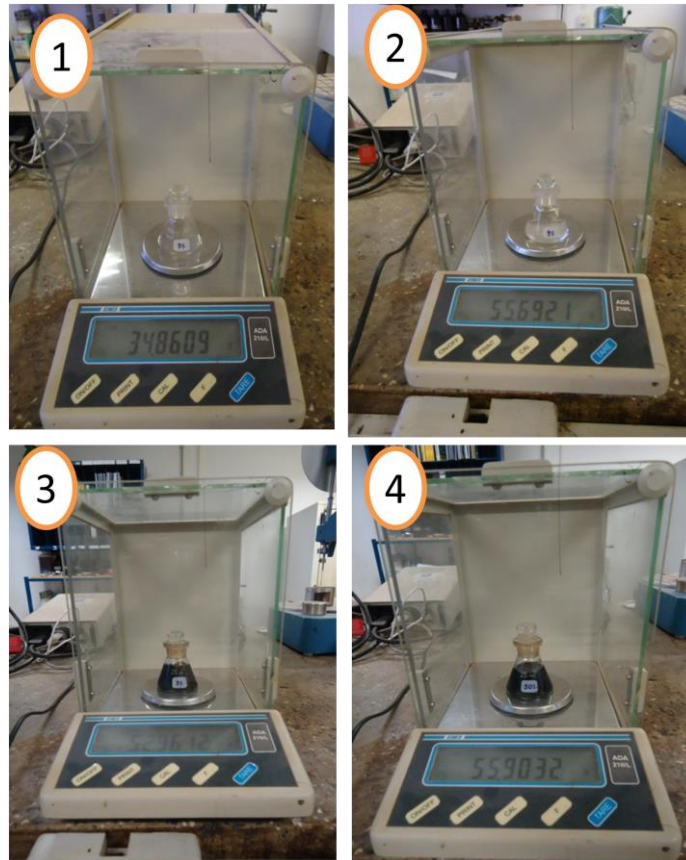


Figura 3.29 – Etapas do ensaio para a detrminação das massas: (1) do picnômetro vazio; (2) do picnômetro cheio de água destilada; (3) do picnômetro com $\frac{3}{4}$ do volume preenchido por ligante e (4) do picnometro contendo ligante mais água.

O cálculo da densidade relativa é dado pela Equação 3.10.

$$DR = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (3.10)$$

2.2.2.7 Viscosidade Absoluta (ASTM D 4402:2002)

O conceito de viscosidade segundo Barnes *et al.* (1989) é relativo a resistência ao escoamento. A viscosidade absoluta é medida através de um torque necessário para fazer girar uma haste imersa na amostra de ligante quente, à velocidade constante.

Para isto, utiliza-se o viscosímetro rotacional (aparelho *Brookfield*) que permite obter a curva temperatura *versus* viscosidade do ligante (Figura 3.30).

A medida da viscosidade é utilizada na determinação da consistência adequada que o ligante asfáltico deve apresentar quando da mistura dos agregados para proporcionar uma perfeita cobertura dos mesmos. Para isso é necessário obter, para cada ligante uma curva viscosidade *versus* temperatura, que permita escolher a faixa de temperatura adequada para as diversas utilizações.

Os ensaios foram realizados nas temperaturas variando entre 135 °C a 177°C, com velocidade de rotação à 20 rpm, utilizando dois tipos de hastes (*spindle*); para CAP 0%, CAP 20% e CAP 40% *spindle* n.º 21 (maior diâmetro) e para CAP 60%, 80% e 100%, *spindle* n.º 27 (menor diâmetro) (Figura 3.31).

Os dados foram utilizados para efeito de comparação ente o CAP natural e o CAP modificado com gesso e também para definir as consistências adequadas na etapa de mistura e compactação dos corpos de prova de CA. O torque e a velocidade são usados para determinar a viscosidade do asfalto, dada em *centipoise* (cP).

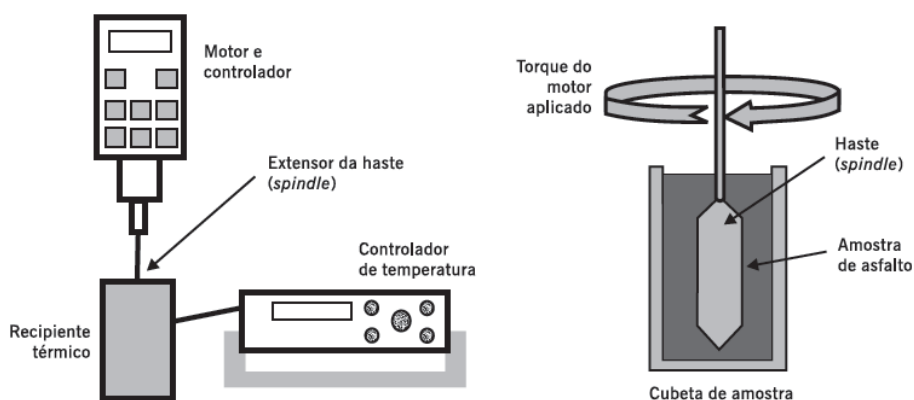


Figura 3.30 – Esquema do funcionamento do aparelho Brookfield (BERNUCCI et al., 2006).



Figura 3.31 – Aparelho Brookfield e detalhe do *spindle* n°21 preso na haste do aparelho.

3.2.2.8 Ensaio de Cisalhamento Dinâmico (DSR)

Os resultados de ensaios empíricos, como penetração e viscosidade, e a caracterização reológica apresentam uma boa correlação com o desempenho do ligante asfáltico sem modificação e/ou aditivos. Entretanto, a caracterização empírica falha para ligantes modificados, pois existe uma série de fatores que podem interferir nessas análises. Para esses ligantes, a reologia pode fornecer uma melhor previsão do desempenho do ligante (VEM & JENKINS, 2003).

Por outro lado, as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos podem influenciar significativamente no desempenho das misturas asfálticas durante o processo de usinagem, compactação e vida em serviço (NAVARRO *et al.*, 2007)

Um material viscoelástico exibe um comportamento intermediário entre o viscoso e o elástico, bem como uma relação dependente do tempo entre a tensão aplicada e a deformação resultante. Torna-se necessário conhecer as condições nas quais os ligantes asfálticos se comportam como viscoelásticos lineares para que se possa obter parâmetros como módulo complexo (G^*), ângulo de fase (δ), módulo elástico ou de armazenamento de energia (G') e módulo viscoso ou de dissipação de energia (G''), já que estes são definidos dentro de uma região de viscoelasticidade linear.

O reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer*), denominado por DSR é utilizado para caracterizar o comportamento viscoso e elástico dos ligantes asfálticos, medindo todos os parâmetros supracitados (Figura 3.32). Em um molde de silicone preparam-se amostras de aproximadamente 1 mm de espessura e 25 mm de diâmetro de ligante, a serem testadas em *spindles* de placas paralelas com diâmetro de 25 mm. As temperatura de ensaio variaram de 46 a 70°C, com frequência de 1,6Hz e uma tensão de 120 Pa, utilizando como base a norma ASTM D-4 Proposal P246.

O ensaio foi realizado apenas em amostras virgens e contou com a colaboração do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (UFC).

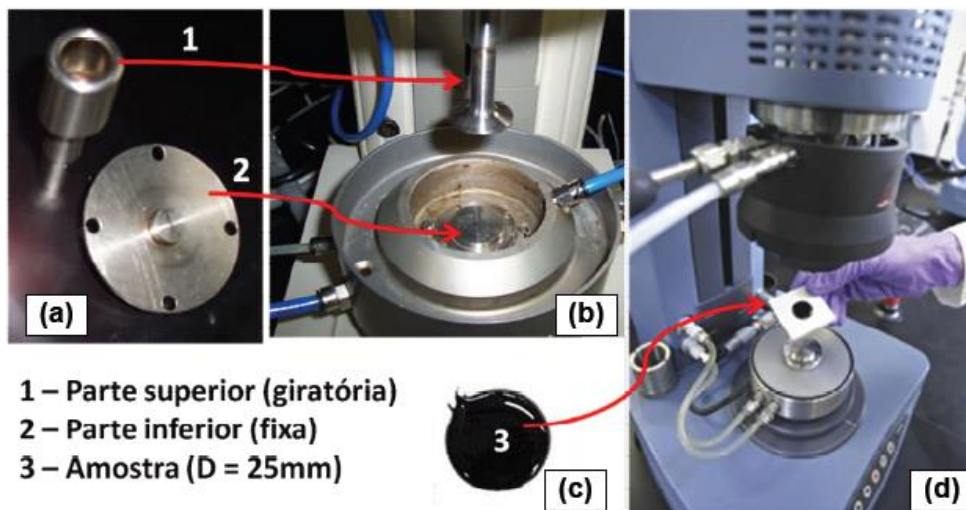


Figura 3.32 – Esquema de ensaio (SILVA, 2011).

De acordo com a SHRP (1994), na determinação do parâmetro para controle de deformação permanente, considera-se o fenômeno de cargas cíclicas. A cada ciclo de carga está sendo realizado um trabalho (W_c) para deformar a superfície asfáltica. Parte desse trabalho é recuperado e parte dissipado na forma de deformação permanente e calor (Figura 3.33). Matematicamente, o trabalho dissipado por ciclo de carregamento (à tensão constante) é dado pela Equação 3.11.

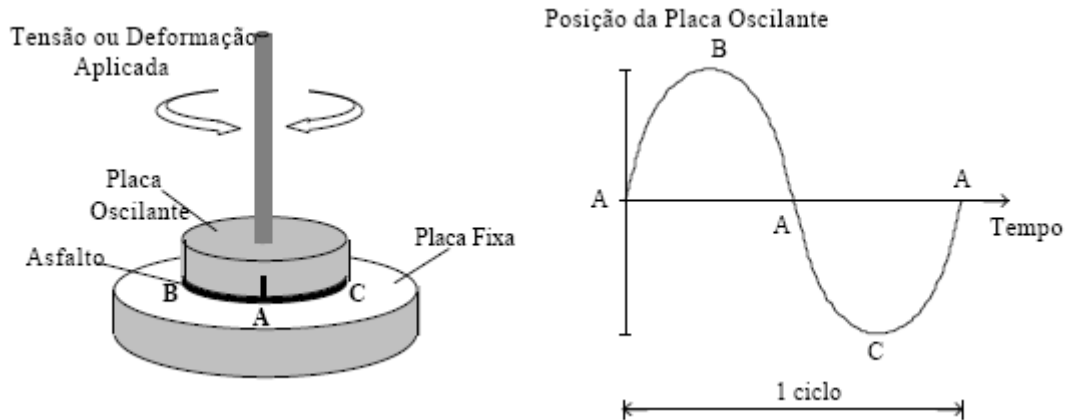


Figura 3.33 – Representação esquemática do fenômeno de cargas cíclicas obtidas no DSR (LEITE, 1999).

$$Wc = \pi\sigma_0^2 \left[1/\left(\frac{G^*}{\text{sen}\delta}\right)\right] \quad (3.11)$$

Conforme Equação 3.11, σ_0 é a tensão aplicada durante o ciclo de carregamento. Portanto, o trabalho dissipado é inversamente proporcional a $G^*/\text{sen}\delta$. O trabalho realizado durante um ciclo de carregamento no revestimento asfáltico pode ser dissipado por diferentes mecanismos: propagação de trinca, calor e fluxo plástico. Todos estes mecanismos de dissipação danificam a estrutura do pavimento, logo é necessário limitar a quantidade de energia dissipada.

A Equação 3.12 apresenta o trabalho dissipado que é diretamente proporcional ao parâmetro $G^*\text{sen}\delta$ e essa análise é obtida com deformação controlada. A energia dissipada por ciclo está limitada e esse limite está diretamente relacionado com ligante e com o parâmetro G^* , pois quanto menor esse parâmetro menor consistência é o ligante. Isso permite que o revestimento asfáltico deforme sem desenvolver tensões elevadas e com baixo valor de ângulo de fase, o que conseqüentemente é característica de material mais elástico e habilita a estrutura do pavimento a voltar a sua condição original sem dissipar muita energia.

$$Wc = \pi\sigma_0^2 [G^*\text{sen}\delta] \quad (3.12)$$

O ângulo de fase ou sua tangente ($\text{tan}\delta$) indicam retardo e o amortecimento na resposta do material, quando submetido a uma tensão ou deformação.

Para os materiais puramente elásticos, o ângulo de fase será zero e para materiais puramente viscosos, o ângulo de fase será 90°. Trata-se de um parâmetro importante para descrever as propriedades viscoelásticas de um material.

A Figura 3.34 demonstra a relação existente entre o ângulo de fase e as propriedades viscoelásticas dos ligantes. O ligante “A” apresenta característica mais viscosa, portanto maior ângulo, enquanto que “B” se aproxima mais da componente elástica, possuindo menor ângulo. Também são representados o módulo complexo (G^*), o módulo elástico G' recuperável e o módulo viscoso G'' não recuperável.

As Equações 3.13, 3.14 e 3.15 definem tais parâmetros.

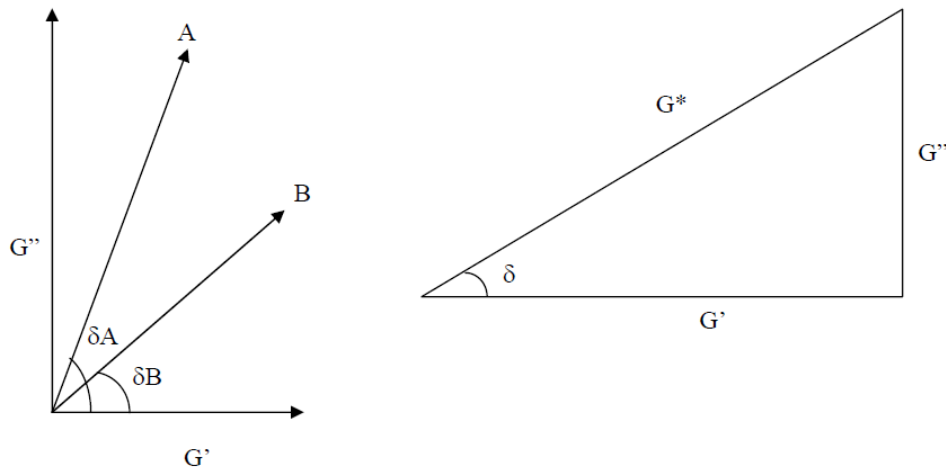


Figura 3.34 – Variação do ângulo de fase com o tipo de ligante asfáltico e relação entre G^* , G' , G'' e ângulo de fase (LIMA, 2008).

$$G' = [G^*] \cos \delta \quad (3.13)$$

$$G'' = [G^*] \sin \delta \quad (3.14)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{G''}{G'} \quad (3.15)$$

Resultados contendo um alto módulo de cisalhamento complexo G^* representará maior rigidez enquanto que um menor δ representará uma maior resposta elástica, portanto, recuperável.

As especificações SUPERPAVE de ligantes asfálticos (ASTM D 6373) definem o parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ como sendo o fator de controle da deformação permanente, no qual para amostras virgens; $G^*/\text{sen } \delta$ deve ser maior que 1,0 kPa e para amostras envelhecidas, maior do que 2,2 kPa.

3.2.2.9 Determinação do efeito do calor e do ar de uma película delgada rotacional (Ensaio de envelhecimento) (ABNT NBR 15235:2009)

Este ensaio simula o envelhecimento do asfalto por meio de aquecimento e recebimento de corrente de ar. Desta forma, simula a oxidação e evaporação durante a produção e execução da mistura asfáltica. O ensaio é realizado colocando-se 35g de ligante em um frasco cilíndrico padrão (Figura 3.35) que gira dentro de uma estufa a 163°C durante 85 minutos. Por meio de um orifício aberto no cilindro, uma corrente de ar atinge o ligante a cada rotação da placa rotativa (Figura 3.36).

O ensaio também é conhecido como RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) e está padronizado pela ASTM 2872-97 e pela comunidade europeia na norma EN 12591-2000.



Figura 3.35 – Pesagem dos ligantes no frasco padrão de ensaio para o ensaio RTFOT.



Figura 3.36 – Frascos dentro da estufa de envelhecimento (acima) e aspecto final do frasco após o ensaio.

É importante a análise de um parâmetro que avalie o potencial de envelhecimento do ligante nas várias fases de utilização: estocagem, usinagem, transporte, compactação e vida em serviço. Porém, há uma complexidade para a avaliação do envelhecimento nessas diversas fases de utilização, sendo referida mais simplesmente a avaliação de seu efeito nas características físicas, que levam ao endurecimento do ligante, verificado pela diminuição da penetração e aumento do ponto de amolecimento e da viscosidade (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Desta forma, os efeitos do calor e do ar são determinados a partir das variações nos valores dos ensaios físicos efetuados antes e após o tratamento na estufa.

4. DOSAGEM E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Realizadas todas os ensaio de caracterização dos materiais constituintes do CA, a próxima etapa do estudo é a produção das misturas asfálticas. Neste Capítulo estão apresentados o método de dosagem utilizado que dará origem a dois grupos de misturas asfálticas: mistura de referência e misturas com adição de fíler gesso, em substituição ao fíler convencional, nas seguintes proporções de substituição: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Posteriormente, serão descritos os métodos de ensaios para a caracterização mecânica das misturas, afim e avaliar os efeitos do fíler gesso na composição dos CA.

4.1 DOSAGEM DAS MISTURAS SEGUNDO O MÉTODO MARSHALL (DNER-ME 043/95)

Após a caracterização e determinação das propriedades de todos os materiais, procedeu-se à etapa de dosagem do concreto asfático, baseada no método *Marshall*. Com as misturas asfálticas produzidas, o próximo passo foi a determinação das propriedades mecânicas das mesmas (Figura 4.1).

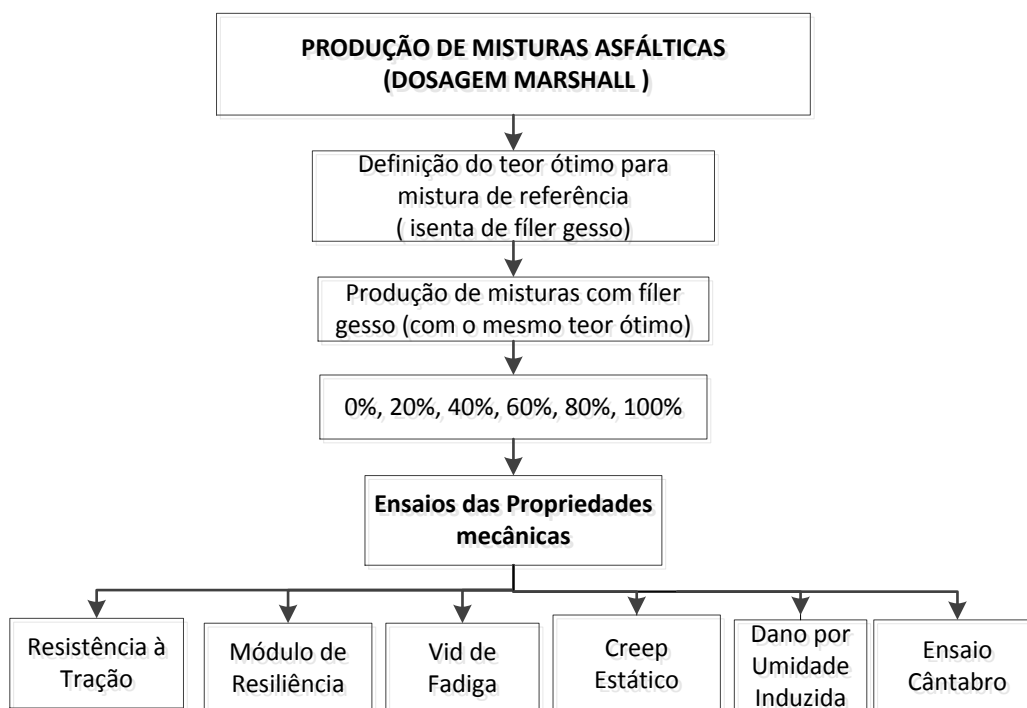


Figura 4.1 – Fluxograma contendo as etapas para a produção das misturas e ensaios para a determinação das propriedades mecânicas.

A dosagem de uma mistura asfáltica consiste na escolha, através de procedimentos experimentais, de um teor dito “ótimo” de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida (que para este trabalho será a faixa C) especificada pelo DNIT (Tabela 4.1). Essa faixa foi escolhida por ser a mais utilizada para CA no Brasil.

Tabela 4.1 - Composição granulométrica do CA conforme faixas granulométricas A, B e C estabelecidas pela norma do DNIT 031/2006-ES. Em destaque a “faixa C” que será utilizada nesta pesquisa.

Peneira de malha quadrada		% em massa passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 -100	100	-	±7%
1"	25,4	75 – 100	95 - 100	-	±7%
¾"	19,1	60 – 90	80 - 100	100	±7%
½"	12,7	-	-	80 – 100	±7%
3/8"	9,5	35 – 65	45 - 80	70 – 90	±7%
Nº4	4,8	25 – 50	28 - 60	44 – 72	±5%
Nº10	2,0	20 – 40	20 - 45	22 - 50	±5%
Nº40	0,42	10 – 30	10 -32	8 - 26	±5%
Nº80	0,18	5 – 20	8 - 20	4 – 16	±3%
Nº200	0,075	1 – 8	3 - 8	2 - 10	±2%
		4,0 – 7,0	4,5 – 7,5	4,5 – 9,0	
Asfalto solúvel no CS2 (+)(%)		Camada de ligação (Binder)	Camada de ligação e rolamento	Camada de rolamento	±0,3%

Com a faixa selecionada, prossegue-se para a determinação da composição granulométrica da mistura de referência: CA-0 (mistura isenta de resíduo). Esta etapa foi feita com o auxílio de uma planilha eletrônica do programa *Microsoft Office Excel* por meio da ferramenta de análise hipotética *solver*, onde, foram solucionadas sistemas de equações que definiam a percentagem passante de cada tipo de agregado, em cada peneira (Tabela 4.2). A composição granulométrica de referência escolhida foi composta por 50% de pó de pedra, 30% de brita nº.0 e 20% de brita nº.01.

A Figura 4.2 apresenta a composição granulométrica da mistura CA-0. Note que CA-0 não contém fíler gesso, apenas a contribuição do fíler calcário (4,7%) em relação à mistura.

Tabela 4.2 – Distribuição granulométrica da mistura CA-0 definidas por meio da planilha eletrônica do programa *Microsoft Office Excel*.

#	Pó de pedra	Brita zero	Brita 1	Gesso	Mistura	Faixa C	
	% passa 50	% passa 30	% passa 20	%passa 0	CA-0	X mín	Xmax
1"	100	100	100	100	100	100	100
3/4"	100	100	100	100	100	100	100
1/2"	100	99,8	53,5	100	90,6	80	100
3/8"	100	93,0	18,5	100	81,6	70	90
Nº4	100	33,3	0,2	100	60,0	44	72
Nº10	67,87	7,6	0,1	100	36,2	22	50
Nº40	25,91	2,7	0,0	100	13,8	8	26
Nº80	17,34	1,4	0,0	100	9,1	4	16
Nº200	9,41	0,0	0,0	100	4,7	2	10

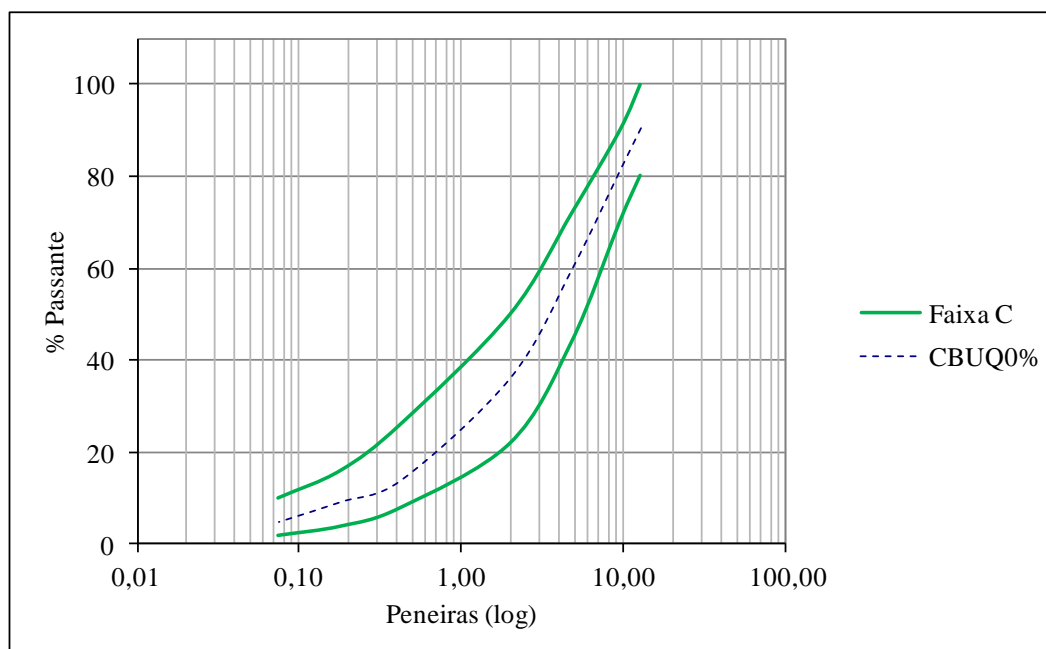


Figura 4.2 – Gráfico da composição granulométrica da mistura CA-0 enquadrada nos limites da Faixa C do DNIT.

As demais misturas foram definidas com base em CA-0. Assim, a fração fíler do pó de pedra foi sendo substituída por fíler gesso de acordo com os seguintes percentuais: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, mantendo-se sempre a mesma percentagem de fíler pré determinada para a composição CA-0. Isto equivale dizer que, em termos de mistura adicionou-se: 0,9%, 1,9%, 2,8%, 3,8% e 4,7% de gesso.

Observa-se também que foi delimitação desta pesquisa, fixar o mesmo teor de CAP para todas as misturas CA-0 (ver item 4.1.3). Desta forma, ao final serão analisadas misturas com a mesma quantidade de fíler, contendo o mesmo teor de CAP.

Após a definição das composições granulométricas foram moldados corpos de prova conforme a metodologia *Marshall*, obedecendo aos critérios estabelecidos na especificação da DNER- ME 031/2006 – ES (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Valores limites para as características requeridas para concreto asfáltico em camadas de rolamento, segundo a DNIT 031/2006-ES.

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento
Porcentagem de vazios, % (Vv)	DNER-ME 043	3 a 5
Relação betume/vazios (RBV)	DNER-ME 043	75 a 82
Estabilidade mínima (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500
Resistência à Tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65

4.1.1 Parâmetros utilizados na definição do teor ótimo de ligante asfáltico

4.1.1.1 *Massa específica aparente (da), massa específica máxima teórica (DMT) e massa específica máxima medida (Gmm)*

Para a definição do teor ótimo a ser utilizado na mistura asfáltica deverão ser determinados os seguintes parâmetros:

- a) Determinação da massa específica aparente da mistura asfáltica compactada (DNER-ME 117/94)

$$d_a = \frac{M_s}{M_s - M_{s\ sub}} \times 0,9977 \quad (4.1)$$

Onde:

M_s = massa seca do corpo de prova compactado

$M_{s\ sub}$ = massa seca do corpo de prova posteriormente submerso em água

- b) Determinação da massa específica máxima teórica (DMT), dada pela ponderação entre as massas dos constituintes da mistura asfáltica, definido na norma de dosagem de misturas asfálticas, ABNT NBR 12891, conforme Equação 4.2. A DMT é utilizada no cálculo de percentual de vazios de misturas asfálticas compactadas.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%A_g}{G_{A_g}} + \frac{\%A_m}{G_{A_m}} + \frac{\%f}{G_f}} \quad (4.2)$$

Onde:

%a = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica

%A_g, %A_m, %f = porcentagem de agregado graúdo, miúdo e fíler, respectivamente expressa em relação à massa total da mistura asfáltica

G_a, G_{A_g}, G_{A_m}, G_f = massa específica reais do asfalto, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do fíler, respectivamente

4.1.1.2 Parâmetros volumétricos

É importante compreender que o projeto de mistura é um processo volumétrico cujo propósito é determinar o volume de asfalto e agregado requerido para produzir uma mistura com as propriedades projetadas. Entretanto, medidas do volume de agregados e asfalto no laboratório ou em campo são muito difíceis. Por essa razão, para simplificar o

problema de medidas, massas são usadas no lugar de volumes e a massa específica é usada para converter massa para volume (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A seguir, serão apresentados os parâmetros volumétricos utilizados para a definição do teor ótimo de ligante. A Figura 4.3 mostra um esquema da volumetria de uma mistura asfáltica para melhor compreensão do leitor.

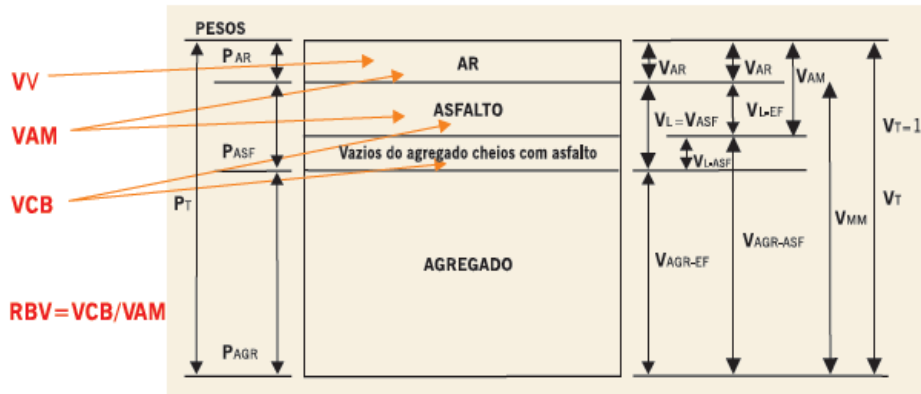


Figura 4.3 - Esquema da volumetria de uma mistura asfáltica (BERNUCCI *et al.*, 2006).

a) Volume de vazios na mistura compactada (V_v)

É a relação entre o volume de vazios ocupado pelo ar e o volume total da mistura, ou seja, é a divisão da diferença entre a densidade máxima teórica e a massa específica aparente da mistura compactada, pela densidade máxima teórica (Equação 4.3).

Misturas com elevada % V_v podem levar a ocorrência de oxidação excessiva do ligante betuminoso, reduzindo a vida útil do concreto asfáltico, além de proporcionar permeabilidade ao ar e água. Misturas com baixo % V_v levam a ocorrência do fenômeno da exsudação.

$$V_v = \frac{DMT - d_a}{DMT} \quad (4.3)$$

b) Vazios cheios com betume (VCB)

Representa tanto o asfalto disponível para mistura como àquele absorvido. É dado pela razão da multiplicação da densidade aparente da mistura compactada pela porcentagem de CAP e a densidade real do CAP, conforme a Equação 4.4.

$$VCB = \frac{da \times \%a}{Ga} \quad (4.4)$$

c) Vazios do agregado mineral (VAM)

Representa o que não é agregado na mistura, ou seja, os vazios com ar e com asfalto. É a soma do volume de vazios (V_v) e dos vazios com betume (VCB), conforme a Equação 4.5.

$$VAM = V_v + VCB \quad (4.5)$$

d) Relação betume-vazios (RBV)

Esta relação indica qual a porcentagem de vazios do agregado mineral é preenchida por betume. É a razão entre os vazios cheios de betume e os vazios do agregado mineral (Equação 4.6).

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (4.6)$$

4.1.2 Moldagem dos corpos-de-prova (CPs)

Os CPs foram moldados conforme a metodologia proposta pelo DNER-ME 043/95, descrita de forma resumida:

- a) Escolha da composição dos agregados, de forma a enquadrar a mistura nos limites da faixa C;

- b) Escolha das temperaturas de mistura e de compactação dos CP's a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante natural. A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que sua viscosidade esteja situada entre 170 ± 20 cP (*centipoise*), respeitando o limite mínimo de 107°C e máximo a 177°C .

A temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15°C acima da temperatura definida para o ligante. Para a etapa de compactação, a temperatura deve ser tal qual o ligante apresente viscosidades variando em 280 ± 30 cP. Com base no gráfico de viscosidade do CAP natural (Figura 4.4), definiu-se as referidas temperaturas para trabalho (Tabela 4.4).

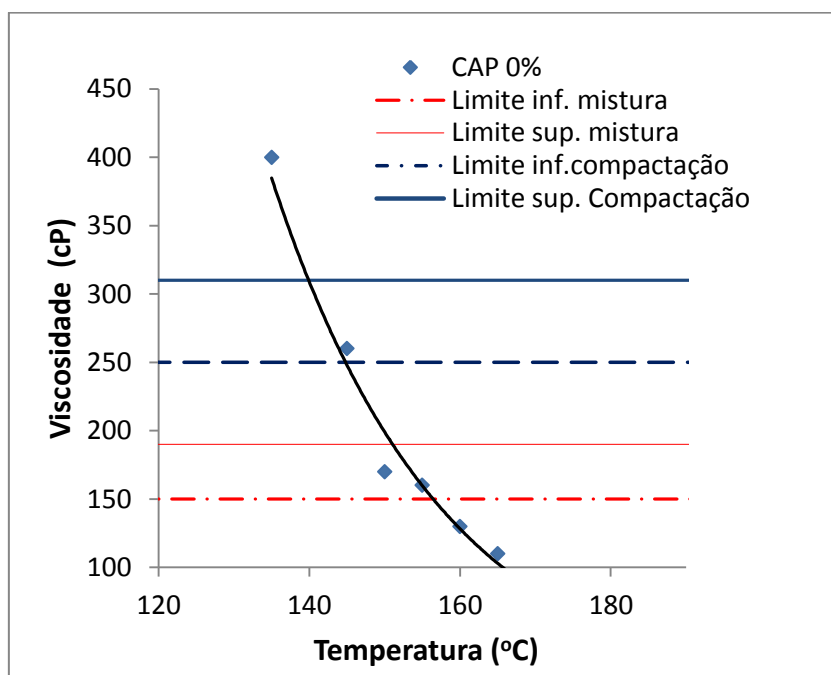


Figura 4.4 - Curva viscosidade versus temperatura definida para o ligante asfáltico.

Tabela 4.4 – Variação de temperaturas de trabalho do ligante, observados os limites normativos.

Temperatura de mistura (°C)	Temperatura de compactação (°C)	Temperatura dos agregados (°C)
150 a 155	140 a 145	160- 165

- c) Definição dos teores de asfalto para os diferentes grupos de CPs a serem moldados. Cada grupo deve ter no mínimo 3 CPs (Teor X - 1%; Teor X - 0,5%; Teor X; Teor X + 0,5%; Teor X + 1%), totalizando 15CPs ao final;
- d) Compactação dos CP's, que no caso desta pesquisa, foi realizada com o auxílio do soquete *Marshall* elétrico;
- e) Após o resfriamento e a desmoldagem dos CPs, obtém-se suas dimensões (diâmetro e altura). Determina-se para cada CP suas massas seca (M_s) e massa seca posteriormente submersa em água ($M_{s\ sub}$), obtendo-se a massa específica aparente da mistura (d_a) e DMT. Com estes dados, calculam-se as relações volumétricas (V_v , V_{CB} , V_{AM}). A Figura 4.5 apresenta imagens das etapas supracitadas.



Figura 4.5 – Etapas do processo de dosagem *Marshall*.

- f) Após as medidas volumétricas, os CPs são submersos em banho maria a 60°C por cerca de 30 a 40 minutos. Retira-se cada CP colocando-o imediatamente no molde de compressão levando-o para a prensa. Determina-se então, os parâmetros mecânicos “Estabilidade” e “Fluência”, segundo método descrito pelo DNER-ME-043/95 (Figura 4.6);
- *Estabilidade (N)*: carga máxima ao qual o corpo de prova resiste antes da ruptura, definida como um deslocamento ou quebra de agregado de modo a causar diminuição na carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante (0,8mm/segundo). A especificação DNIT-ES-031/2006 estabelece que a estabilidade mínima para concretos asfálticos, a 75 golpes deve ser igual a 500 kgf;
 - *Fluência (mm)*: deslocamento máximo na vertical apresentado pelo corpo de prova correspondente à aplicação da carga máxima.



Figura 4.6 - Corpos de prova submersos em banho- maria e equipamento utilizado no ensaio de estabilidade e fluência tendo como detalhe o CP inserido no molde de compressão.

4.1.3 Determinação do teor de projeto (TP) do ligante asfáltico para a mistura de referência.

Com todos os parâmetros volumétricos e mecânicos obtidos, foram plotadas curvas em função do teor de asfalto, as quais podem ser usadas na definição do teor de projeto ou teor ótimo (Figura 4.7). Observa-se que para os parâmetros Vv e RBV, estabilidade mínima, são estabelecidos limites de valores, conforme DNIT 031/2006-ES, além da resistência à tração por compressão diametral (Tabela 4.5).

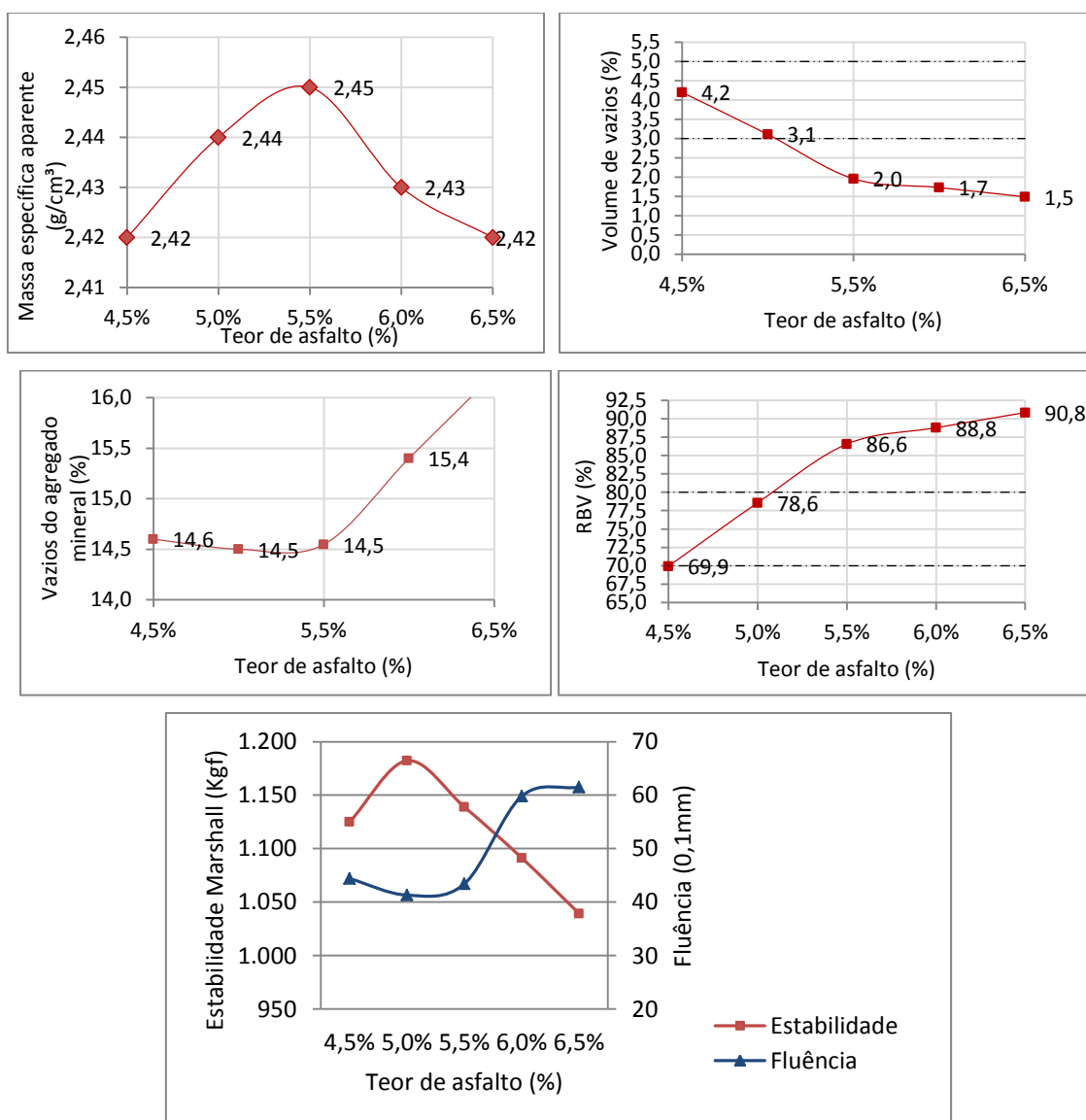


Figura 4.7 – Curvas dos parâmetros determinadas na dosagem Marshall para a mistura de referência (CA-0).

Tabela 4.5 - Valores limites das características especificadas para concreto asfáltico segundo DNIT 031/2006-ES.

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento
Volume de vazios, % (Vv)	DNER-ME 043	3 a 5
Relação betume/vazios (RBV)	DNER-ME 043	75 a 82
Estabilidade mínima (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500
Resistência à Tração por compressão Diametral estática a 25C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65

Na presente pesquisa, a escolha do teor ótimo do ligante asfáltico foi baseada em função de dois parâmetros volumétricos, Vv e RBV. Este método de determinação de teor ótimo de CAP é o mesmo adotado pelo DNIT, sendo descrito por Soares *et. al.* (2000). De cada grupo de CPs, tomam-se os cinco valores médios de Vv e RBV, conforme Figura 4.8.

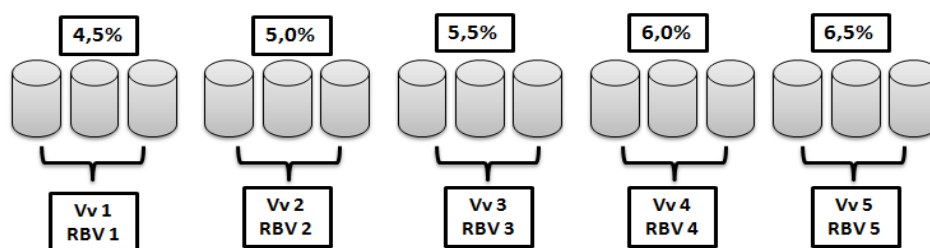


Figura 4.8 – Representação esquemática dos grupos de corpo de prova.

O próximo passo é traçar um gráfico contendo o teor de asfalto (eixo “x”) *versus* Vv (eixo “y₁”) e RBV (eixo “y₂”). A partir da interseção das linhas de tendência do Vv e do RBV com os limites respectivos de cada um destes parâmetros, são determinados quatro teores de CAP (X1, X2, X3 e X4). O teor ótimo é selecionado tomando a média dos dois teores centrais, ou seja, teor ótimo = (X2+X3)/2, conforme Figura 4.9.

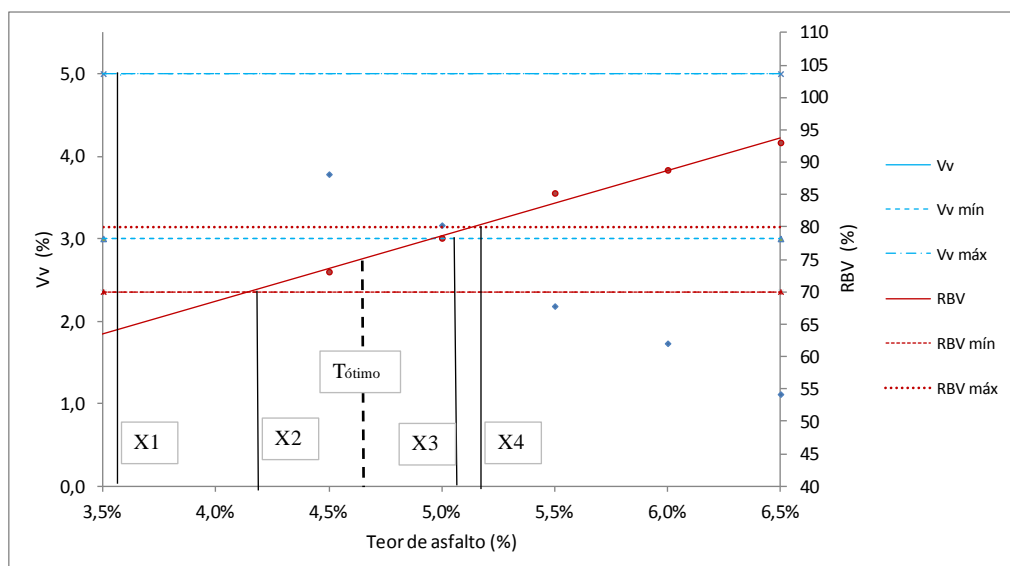


Figura 4.9 – Gráfico traçado para a determinação do teor ótimo de ligante para a mistura de referência contendo os valores limites para Vv e RBV, conforme DNIT 031/2006-ES.

A partir do gráfico (Figura 4.9) observa-se que o teor ótimo encontrado, dado a média de X2 e X3 foi igual a 4,67. Por uma questão de não se trabalhar com uma quantidade de CAP inferior ao determinado graficamente, definiu-se como teor ótimo para as misturas o valor de 5%. Vale ressaltar que, conforme a curva estabilidade *Marshall* (Figura 4.7) o teor 5% é o que apresentou melhor resultado neste parâmetro, o que reforça a opção por este valor.

A Tabela 4.6 apresenta um resumo dos principais parâmetros volumétricos determinados no estudo de dosagem da mistura de referência, conforme especificado na DNIT 031/2006-ES.

Tabela 4.6 - Parâmetros volumétricos determinados na dosagem Marshall para a mistura de referência (CA-0).

Mistura referência	
(Teor de CAP = 5,0%)	
Parâmetros	CA-0
da (g/cm ²)	2,43
Vv (%)	3,10
DMT	2,51
RBV	78

4.1.4 Dosagem das misturas com adição de gesso e mistura de referência

Após a definição do teor ótimo da mistura de referência, novas misturas foram produzidas com a adição de fíler gesso, em substituição gradativa do fíler calcário e novamente uma mistura de referência, conforme a mesma metodologia de dosagem *Marshall*, descrita anteriormente. Observa-se que é desejável para esta pesquisa, fixar a mesma quantidade de CAP para todas as misturas contendo gesso, tornando o teor de CAP, um parâmetro invariável.

É importante destacar que na etapa de pesagem dos agregados para as composições das misturas, foi necessário considerar determinada característica do gesso em estudo, detectada pelo ensaio de ATG, que apontou perda de massa deste material quando submetido à temperaturas acima de 100°C (ver item 5.1.9). A perda de massa ocorre pela desidratação do gesso, que obteve valor de 19% nesta pesquisa. Logo, quando da pesagem do fíler gesso, considerou-se 19% de perda em relação à massa calculada por meio da planilha *Excel* (Tabela 4.2).

A Figura 4.10 apresenta fotografias das composições das misturas, de acordo com os percentuais de adição de fíler gesso, totalizando 6 tipos de CA diferentes, dando origem aos CPs (Figura 4.11).

4.1.4.1 Temperaturas de trabalho

As temperaturas de mistura e compactação dos CPs com adição de gesso, apresentadas na Tabela 4.7 foram adequadas às curvas viscosidade-temperatura obtidas do ensaio de viscosidade (item 5.2.2). Lembrando que a norma DNER-ME 043/95 fixa as seguintes condições:

- Temperatura do ligante no momento da mistura com os agregados: deve ser tal que sua viscosidade esteja situada entre 170 ± 20 cP, respeitando o limite mínimo de 107°C e máximo a 177°C;
- Temperatura de compactação: deve ser tal qual o ligante apresente viscosidades variando em 280 ± 30 cP.



Figura 4.10 – Composições das misturas de referência e com adição de fíler gesso para produção de CPs.



Figura 4.11 – Corpos de prova de CA produzidos, de acordo com as suas respectivas composições.

Tabela 4.7 – Variação das temperaturas de trabalho dos ligantes modificados, observados os limites normativos para a viscosidade do ligante natural.

	Temperatura de mistura (°C)	Temperatura de compactação (°C)	Temperatura dos agregados (°C)
CAP20%	160 -165	150 – 155	170 - 175
CAP40%	177 - 181	165 – 169	187 - 192
CAP60%	185 -190	172 – 177	195 - 200
CAP80%	196 - 200	186 – 192	206 - 211
CAP100%	200 - 204	194 – 196	210 - 215

Analisando a Tabela 4.7 observa-se que as temperaturas de trabalho para CAP 60%, CAP 80% e CAP 100% não podem ser utilizadas, quando observados os limites normativos para o ligante natural. Isto já era esperado uma vez que, maiores percentuais de gesso trazem como efeito, o aumento da viscosidade e por isso, necessitam de temperaturas mais elevadas para que atendam aos limites de viscosidade estabelecidos por norma.

Tendo em vista este comportamento, a temperatura de mistura utilizada para os CAP 60%, 80% e 100% foi próxima a do limite máximo (177°C), com a ressalva de que o tempo da mistura dos materiais, foi maior do que das outras (em torno de 3 minutos), na tentativa de obter o máximo de recobrimento dos agregados pelo CAP.

4.1.4.2. Parâmetros volumétricos de dosagem Marshall para as misturas com adição de gesso.

A Tabela 4.8 contém os resultados dos parâmetros volumétricos obtidos da dosagem Marshall dos CPs contendo gesso e da mistura de referência. Observa-se que os valores da densidade aparente quase não alteraram, além de que Vv e DMT sofreram pequena diminuição, à medida que os percentuais de gesso foram sendo acrescentados..

Tabela 4.8 - Parâmetros volumétricos determinados na dosagem Marshall para as misturas com fíler gesso e mistura de referência.

Misturas (Teor de CAP = 5,0%)						
Parâmetros	CA-0	CA-20	CA-40	CA-60	CA-80	CA-100
da(g/cm ²)	2,43	2,435	2,43	2,44	2,45	2,45
V _v (%)	3,10	2,92	2,69	2,62	2,54	2,24
DMT	2,51	2,52	2,51	2,50	2,49	2,49
RBV	78	78,78	79,90	80,01	80,96	81,46

Nota-se que os resultados dos parâmetros volumétricos calculados para cada mistura, foram muito próximos, provavelmente, devido às misturas obterem o mesmo teor de CAP e composição granulométrica similar, somente havendo alteração nos percentuais de fíler gesso, em substituição ao fíler calcário. Por tal motivo, a influência dos parâmetros nas características mecânicas dos CPs não será alvo de análises.

4.1.5 Estabilidade e Fluência *Marshall* para todas as misturas asfálticas

Os ensaios de estabilidade e fluência Marshall também foram realizados para as misturas contendo fíler gesso, uma vez que são parâmetros mecânicos que fazem parte da metodologia de dosagem Marshall, sendo moldados 3 CPs para cada teor.

Os resultados estão apresentados na Figura 4.12 e demonstram que os valores para a Estabilidade foram crescentes até CA-40, ocorrendo posteriormente um declínio, mais a partir de CA-60. Percebe-se então, que a presença de fíler gesso, em altos teores promove a diminuição da carga máxima que o CP suporta antes da ruptura, associada a um deslocamento.

Logo, estes resultados podem estar associados ao próprio condicionamento do ensaio que submete os CPs ao banho maria, à temperatura de 60°C, por um período de 30 minutos. Esta exposição à água, assim como será visto em outros ensaios, acarreta uma diminuição da resistência do CP, quando constituído por maiores teores de gesso.

A estabilidade está associada a um dado deslocamento, e neste sentido, CA- 40, CA-60 e CA-80, apresentaram os melhores desempenhos, pois alcançaram maiores valores de estabilidade, relacionados a menores deslocamentos, correspondente à carga máxima aplicada. Entretanto, todas as misturas estudadas atenderam ao limite mínimo de estabilidade (500 Kgf) preconizada pela norma DNIT 031/2006 – ES.

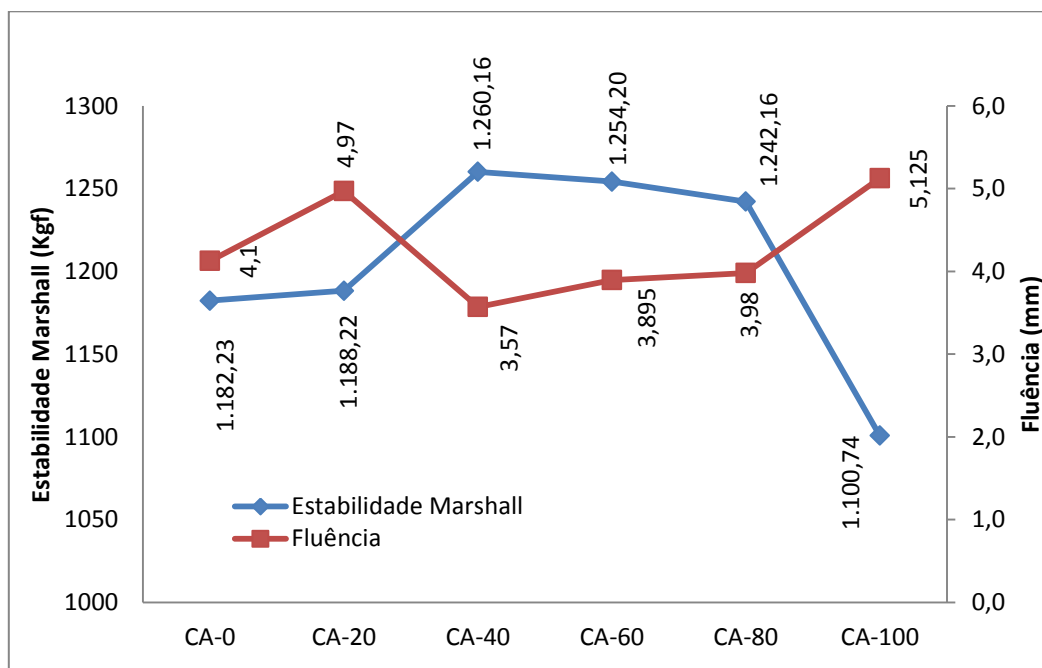


Figura 4.12 – Resultados dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall para todos os teores.

4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS

Definidos o teor ótimo de CAP, sendo o mesmo para todas as composições, foram realizados ensaios mecânicos com o objetivo de melhor avaliar o desempenho das misturas asfálticas, por meio dos seguintes ensaios:

- a) Resistência à tração por compressão diametral (RT);
- b) Módulo de resiliência (MR);
- c) Vida à fadiga (VF);
- d) Deformação permanente através de compressão axial estática (*creep* estático);
- e) Dano por umidade induzida;
- f) Ensaio Cantabro.

Para cada ensaio moldaram-se 3 CPs, contabilizando 18CPs por mistura e 108 no total. Os ensaios de RT foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UnB e os demais, realizados no Laboratório de Engenharia Rodoviária – LER/CEFTRU /UnB.

A seguir, serão apresentadas as definições dos ensaios, com as suas respectivas metodologias, destacando a sua importância para o revestimento asfáltico.

4.2.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração (RT) corresponde à máxima tensão de tração suportada por um corpo de prova quando submetido a um carregamento estático de compressão, ao longo do plano diametral, até a sua ruptura. O método de ensaio está descrito pelo DNER-ME 138/94.

O esforço a que o CP é submetido gera uma tensão de tração, perpendicular à direção da aplicação da força e da maior direção do friso que distribui a carga no CP, ou seja, gera um estado de tensões biaxial, sendo de compressão na direção vertical e de tração na horizontal (Figura 4.13).

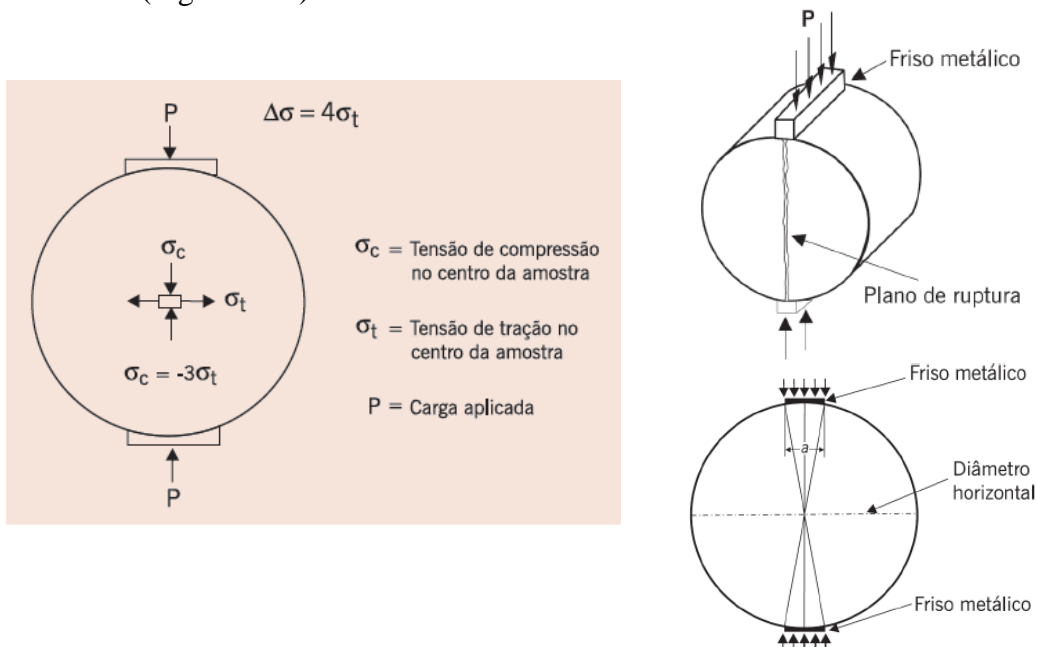


Figura 4.13 Apresentação das tensões no centro da amostra do corpo de prova; esquema de compressão diametral do corpo de prova (BERNUCCI *et al.*, 2006; DNER - ME 138/94).

A resistência à tração é determinada a partir da Equação 5.7 tendo como dados de entrada dados a carga de ruptura, diâmetro e altura dos CPs. De acordo com a DNIT 031/2006 – ES o valor mínimo da RT para concretos asfálticos, deve ser igual a 0,65 MPa.

$$RT = \frac{2F}{100\pi Dh} \quad (5.7)$$

Onde:

RT = resistência à tração (MPa)

F = carga de ruptura (N)

D = diâmetro do CP (cm)

H = altura do CP (cm)

A Figura 4.14 apresenta o equipamento utilizado para a execução do ensaio e um detalhe do molde centralizador.

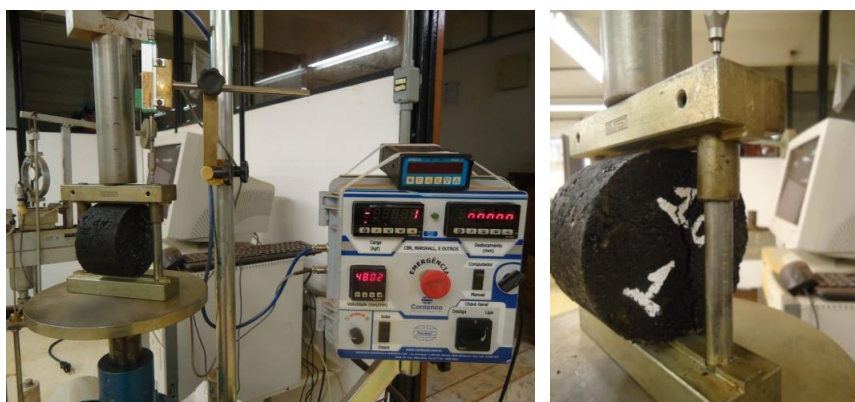


Figura 4.14 – Equipamento para ensaio de resistência à tração por compressão diametral e o detalhe do dispositivo centralizador.

4.2.2 Ensaio de módulo de resiliência

O termo resiliência está difundido na área de pavimentação como representativo do comportamento elástico dos materiais sujeitos a cargas cíclicas. Este ensaio permite a obtenção de parâmetro útil a análise de tensões e deformações do pavimento e ao dimensionamento mecânico da espessura das camadas.

O ensaio de módulo de resiliência (MR) é padronizado, no Brasil pela norma DNER-ME133/94 que o define como a relação entre a tensão de tração (σ_t), aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável (ϵ_t) correspondente à tensão aplicada, numa dada temperatura (T), conforme a Equação 4.7.

$$MR = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} \quad (4.7)$$

Observa-se que a força aplicada deve ser limitada a uma tensão de no máximo 30% da RT, caso contrário, o CP pode romper por fadiga durante ou ao final do ensaio. A temperatura de requerida é de $25 \pm 5^\circ\text{C}$, e neste caso, foi mantida com o auxílio de um climatizador. Para o controle da temperatura durante a execução do ensaio, utilizou-se um CP teste, no qual estavam instalados sensores e assim, possibilitavam a verificação da temperatura da sala. Similar ao ensaio de RT anotaram-se as dimensões diametralmente opostas, sendo o CP, em seguida, ajustado ao molde.

Os deslocamentos horizontais, induzidos pelo carregamento vertical, foram medidos por meio de dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*) em posições diametrais, a fim de minimizar o efeito de possíveis irregularidades na superfície dos CPs. A Figura 4.15 apresenta o equipamento e a aparelhagem utilizada para o ensaio.

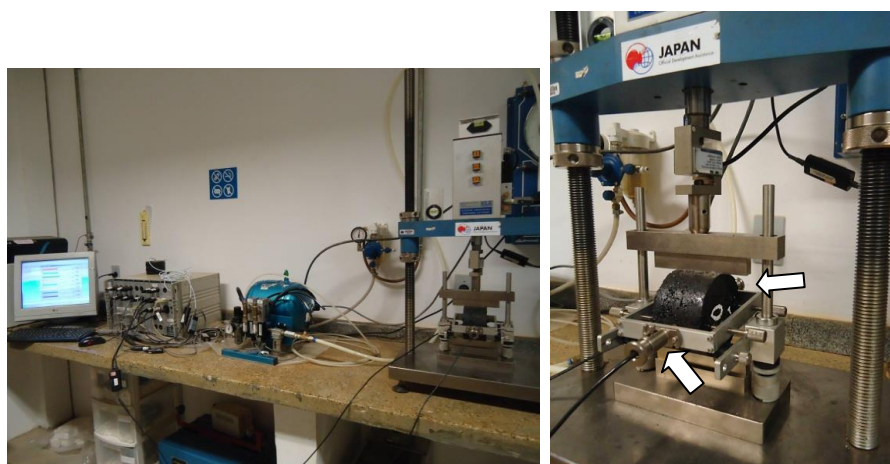


Figura 4.15 – Visão geral do equipamento para ensaio de módulo de resiliência (à esquerda); molde de ensaio e detalhe dos LVDT's conectados ao molde.

Posicionado o CP no molde, o ensaio consiste na aplicação de 505 pulsos de carga, onde 500 destes referem-se à etapa de condicionamento da amostra. Ao fim do ensaio, o resultado obtido corresponde à média aritmética dos últimos 5 pulsos de carregamento. Esses dados são fornecidos diretamente do programa UTM 16 V2.05 *Indirect Tensile Modulus Test* que controla o equipamento (Figura 4.16).

A frequência de carregamento utilizada foi de 1s para cada ciclo, correspondendo à aplicação de carga 0,1s e deslocamento de 0,9s. Os procedimentos de ensaio foram baseados na norma ASTM D 4123/95.

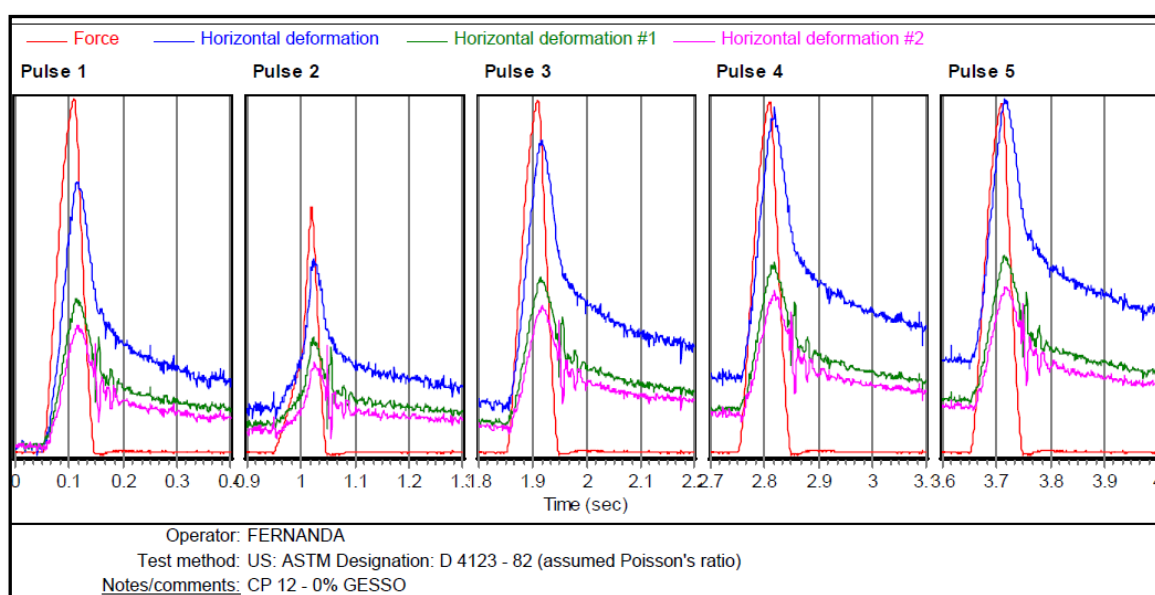


Figura 4.16 – Tela de ensaio de MR finalizado.

4.2.3 Ensaio de Vida de Fadiga por compressão diametral

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. Entretanto o processo repetitivo culmina degradações irreversíveis, fenômeno esse conhecido como fadiga.

A ASTM (1979) define fadiga como o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras, as quais contribuem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos. Para revestimentos asfálticos, resultados de ensaio de vida de fadiga têm sido usados com frequência como critério de dimensionamento (PINTO, 1991).

Benevides (2000) complementa afirmando, que o fenômeno de fadiga ocorre em função de um processo de deterioração da estrutura do material quando sofre a ação de cargas repetidas das rodas dos veículos, gerando tensões de tração na camada de revestimento betuminoso.

O ensaio de fadiga por compressão diametral de cargas repetidas consiste na aplicação diametral de cargas solicitantes verticais que devem induzir ao CP, tensões normais ao plano vertical diametral de 10% a 40% da tensão de ruptura estática. Pode ser realizado à tensão controlada (TC), isto é, a tensão σ repetidamente aplicada é induzida pela força vertical distribuída no friso da geratriz sem alteração até a ruptura do CP; ou realizado à deformação controlada (DC), cujo mecanismo é mais complexo caso não se disponha de um servo-mecanismo retroalimentador que permita ajustar a força aplicada em função dos desvios da deformação medida (MEDINA & MOTTA, 2005).

Embora ainda não normalizado, o ensaio de fadiga tem sido realizado pelos pesquisadores do país à compressão diametral, sob tensão e temperatura controladas. Nesta pesquisa, a metodologia de ensaio também foi desenvolvida sob tensão e temperatura controladas, a uma temperatura de $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ (sala climatizada) onde os CPs foram submetidos a carregamentos equivalentes a 30%, 40% e 50% da resistência à tração (RT) referente a cada mistura.

A frequência de ensaio foi igual a 60 aplicações por minuto (1Hz) com 0,10 segundo de duração do carregamento repetido. O equipamento utilizado foi o mesmo trabalhado nos ensaio de módulo de resiliência (Figura 4.17). Os dados foram obtidos por meio do programa UTM 19 V2.02 *Dynamic Creep Test* que fornecia o número de ciclos e a tensão necessários à ruptura do CP (Figura 4.18).

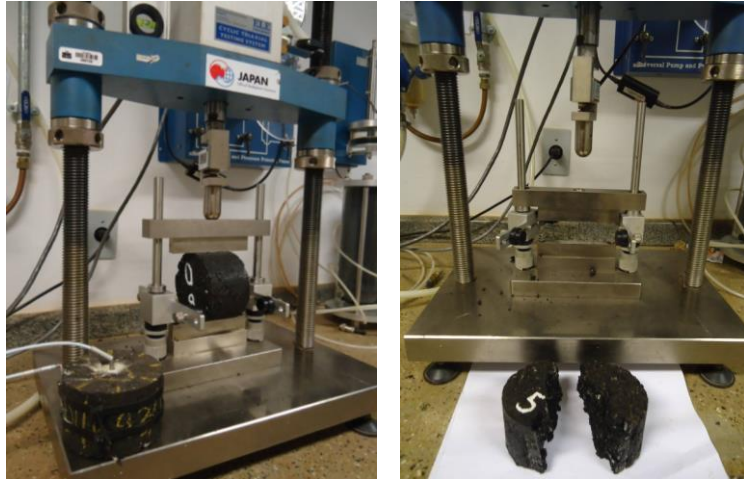


Figura 4.17 – Equipamento utilizado para ensaio de vida à fadiga (à esquerda); CP rompido após conclusão do ensaio.

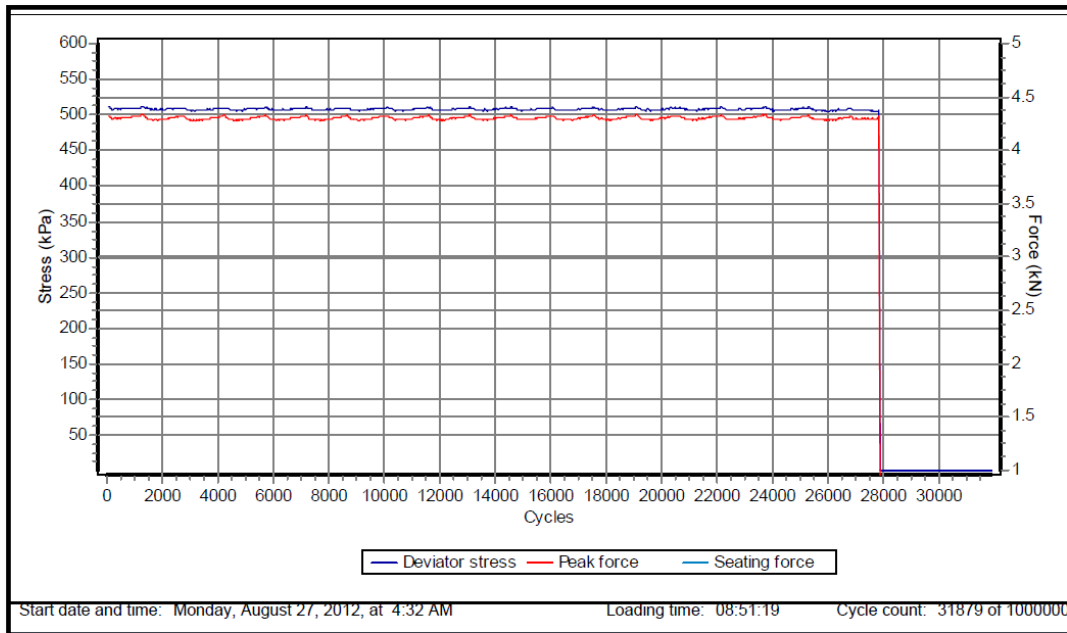


Figura 4.18 – Tela de ensaio de fadiga finalizado, indicando a tensão de ruptura e o número de ciclos totais.

A vida de fadiga (VF), expressa pelo número de repetições (N) está relacionada à tensão de tração (σ_t), sendo obtida pela equação 4.9.

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_1} \quad (4.9)$$

Onde:

N = vida de fadiga

$\Delta\sigma$ = tensão de tração repetida atuante

K_1, n_1 = constantes determinadas a partir dos resultados de laboratório em escala logarítmica

Inicialmente calcula-se o carregamento vertical a ser aplicado em função de uma percentagem da carga de ruptura, utilizando-se a Equação 4.10, originada da equação da resistência à tração de misturas betuminosas:

$$F_v = \frac{100 \cdot \pi \cdot D_{CP} \cdot h_{CP} \cdot \sigma_t}{2} \quad (4.10)$$

Onde:

F_v = carga vertical aplicada (N);

σ_t = tensão de tração correspondente a uma porcentagem da resistência à tração (MPa);

D_{CP} = diâmetro do corpo de prova (cm)

h_{CP} = altura do corpo de prova (cm)

Obtendo-se F_v , calculam-se as diferenças de tensões ($\Delta\sigma$), por meio da Equação 4.11.

$$\Delta\sigma = \frac{8 \cdot F_v}{100 \cdot \pi \cdot D_{CP} \cdot h_{CP}} \quad (4.11)$$

Onde:

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

F_v = carga vertical aplicada (N)

σ_t = tensão de tração correspondente a uma porcentagem da resistência à tração (MPa)

D_{CP} = diâmetro do corpo de prova (cm)

4.2.4 Deformação permanente por compressão uniaxial sob carga estática (*Creep* estático)

Além da vida de fadiga, é importante a caracterização das misturas de modo a avaliar o seu comportamento frente às deformações permanentes. Para tal, foi realizado o ensaio de *creep* estático, que consiste em submeter o CP a uma carga de compressão estática axial, durante um período estabelecido, de onde é possível obter as deformações do CP em função do tempo.

O ensaio teve duração total de 1h15min, onde, na primeira hora o CP ficou sob o efeito do carregamento de 100 kPa e após este tempo, o carregamento foi retirado, deixando o CP descarregado durante 15 min. As leituras das deformações ao longo do tempo do ensaio foram feitas com o auxílio de LVDTs posicionados sobre a placa de carregamento. A Figura 4.19 apresenta uma tela do programa UTM 52 V2.12b *Static Creep Test* utilizado para a aquisição de dados.



Figura 4.19 – Tela de ensaio *Creep* estático finalizado.

Observa-se que as faces do CP devem estar paralelas e perpendiculares ao sentido da aplicação da carga, de modo que a carga seja aplicada uniaxialmente. Desta forma, optou-se por fazer o capeamento dos CPs utilizando pasta de cimento. Estes detalhes do ensaio podem ser observados na Figura 4.20

Antes da execução dos ensaios, os CPs foram condicionados à temperatura de 25°C por durante 8 h, para garantir o equilíbrio térmico das amostras. Ao decorrer do ensaio, a temperatura ambiente no laboratório, manteve-se em 25°C através de ajustes no climatizador e verificação do CP teste.

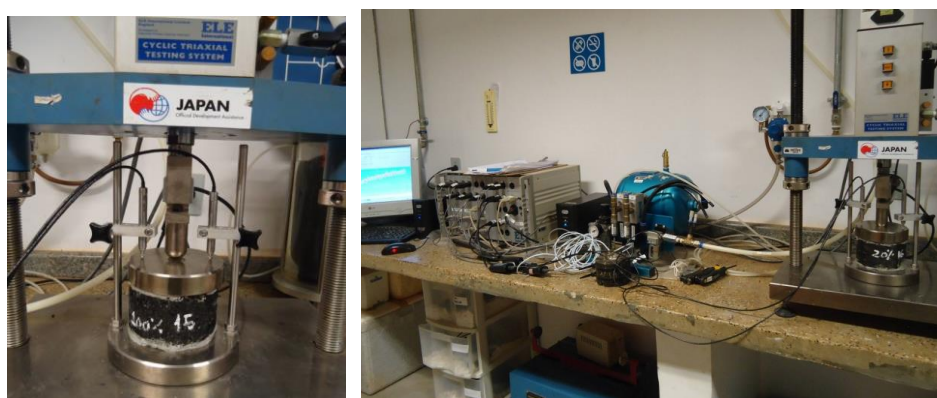


Figura 4.20 – Detalhe dos CP com as faces capeadas e LVDTs posicionados na placa de carregamento (à esquerda); visão geral do equipamento para o ensaio de *creep* estático.

A deformação relativa ao final de uma hora de carregamento pode atingir um estágio avançado de dano, que caracterizaria a mistura como não adequada a resistir às deformações permanentes. Porém, o principal parâmetro obtido no ensaio de *creep* é o comportamento da deformação do CP durante o período do ensaio, que é importante na solução de problemas envolvendo materiais viscoelásticos lineares, como as misturas asfálticas.

4.2.5 Dano por umidade induzida

A avaliação do potencial ao dano por umidade, em misturas asfálticas é de grande importância, uma vez que afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos.

Na realidade, o dano por umidade evidencia os possíveis problemas de adesividade agregado-ligante asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Dentre os ensaios existentes, trabalhou-se com o normalizado pela ASTM D 4867. O procedimento é baseado no condicionamento dos CPs, submetendo-os a um ciclo de congelamento ($-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$) durante 15h, seguido de banho maria à temperatura de 60°C por 24h. Entretanto, o ensaio foi reproduzido sem submeter os CPs ao ciclo de congelamento, devido à inexistência de equipamento refrigerador no laboratório, simulando, assim, os efeitos deletérios da água apenas na condição de $T = 60^{\circ}\text{C}$ (condição mais realista de exposição do pavimento no Brasil).

Foram analisados dois grupos de CPs: um grupo não condicionado e outro condicionado. O primeiro foi submetido ao ensaio de RT à temperatura de 25°C , sendo este resultado os mesmos apresentados no item 5.3.1. O segundo grupo, passou pelo seguinte processo: a) foi condicionado à saturação com água durante o tempo necessário para atingir 55 a 80% do seu volume de vazios, com o auxílio de uma bomba de vácuo; b) em seguida, foi imerso em banho à 60°C por um período de 24h e c) inserido novamente em banho, à temperatura de 25°C por durante 1h. A Figura 4.21 apresenta a sequência das referidas etapas.

Ao final, os CPs foram ensaiados para a determinação dos valores de suas resistências à tração por compressão diametral, obtendo-se assim, a relação entre a resistência à tração dos grupos dos CPs condicionados à umidade (RT_u) e os grupos de CPs não condicionados (RT).

A relação entre RT_u e RT é chamada de Razão de Resistência à Tração (RRT) (Equação 4.12). De acordo com a especificação de AASHTO MP 8-01 o limite mínimo aceitável para misturas contínuas é quando tem-se a $RRT \geq 70\%$. Logo, amostras com valores de RRT maior ou igual a este limite não são consideradas suscetíveis ao dano por umidade.

$$RRT = \frac{RT_u}{RT} \cdot 100 \quad (4.12)$$

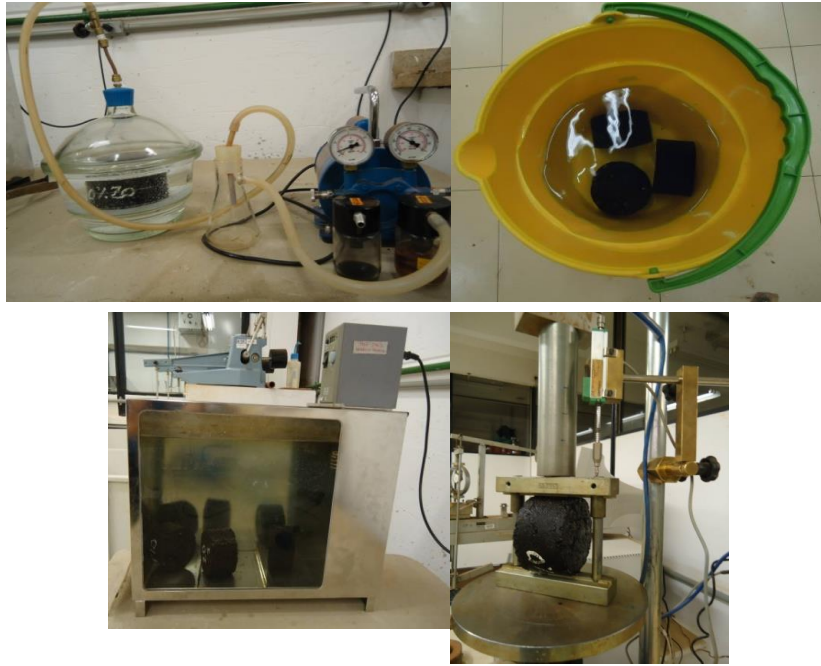


Figura 4.21 – Sequência de procedimentos do ensaio de umidade induzida.

4.2.6 Ensaio Cantabro

O ensaio Cantabro tem por objetivo avaliar o comportamento de misturas asfálticas quanto à perda de material, ou seja, o seu desgaste quando submetidos ao atrito, tal qual a situação de arrancamento de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento. O procedimento de ensaio é baseado na norma NBR 15140.

O método de ensaio é bastante similar ao utilizado para determinar o desgaste à abrasão do agregado graúdo, porém utiliza o CP sem as esferas de aço dentro do equipamento *Los Angeles*, perante 300 rotações no interior da máquina que gira a uma velocidade de 30 a 33rpm.

O desgaste da mistura asfáltica por abrasão é dado pela Equação 4.13, sendo o resultado final a média aritmética de três amostras.

$$A = \frac{P-P'}{P} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.13)$$

Onde:

A = desgaste da mistura asfáltica

P = massa do CP, antes do ensaio

P' = massa do CP, após o ensaio

A Figura 4.22 apresenta fotografias que ilustram a sequência do ensaio.



Figura 4.22 – Determinação da massa inicial; processo de desgaste no equipamento *Los Angeles* e determinação da massa final, após o ensaio.

O ensaio Cantabro não é normalizado para misturas densas, entretanto a obtenção de tais resultados é importante por permitir comparações entre as misturas de referência e as com adição de gesso, para assim, avaliar o nível de desagregação (perda de material) destas, quando submetidas ao desgaste.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 RESULTADOS E ANÁLISES DA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E FÍLER

Para uma avaliação mais completa da mistura asfáltica é fundamental o conhecimento dos materiais usados no seu preparo, principalmente quanto aos aspectos inerentes à durabilidade da mistura ao longo da vida de serviço do revestimento. Desta forma, a seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados nesta pesquisa.

5.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica dos agregados brita 1, brita zero e pó de pedra estão apresentadas na Figura 5.1, é fundamental para se obter uma mistura asfáltica com propriedades adequadas à sua finalidade. Por outro lado, o gesso utilizado como fíler também exerce grandes influências no bom desempenho da mistura e por isso deve ser determinada sua análise granulométrica.

A granulometria do gesso apresentada na Figura 5.2 revela que 90% das partículas são menores que 20 μ m. Para Barra *et al.* (2005), a fração do fíler que tem diâmetro maior que 20 μ m, contribui na formação do esqueleto mineral da mistura, preenchendo os vazios entre os agregados graúdos e miúdos, e aderindo aos agregados graúdos, atuando, em vários casos, como melhoradores de adesividade.

Por outro lado, a fração com diâmetro menor que 20 μ m permanece em suspensão no CAP, denominado fíler ativo, responsável por aumentar a viscosidade do ligante, alterando o ponto de amolecimento, diminuindo a suscetibilidade térmica, e aumentando a resistência à deformação.

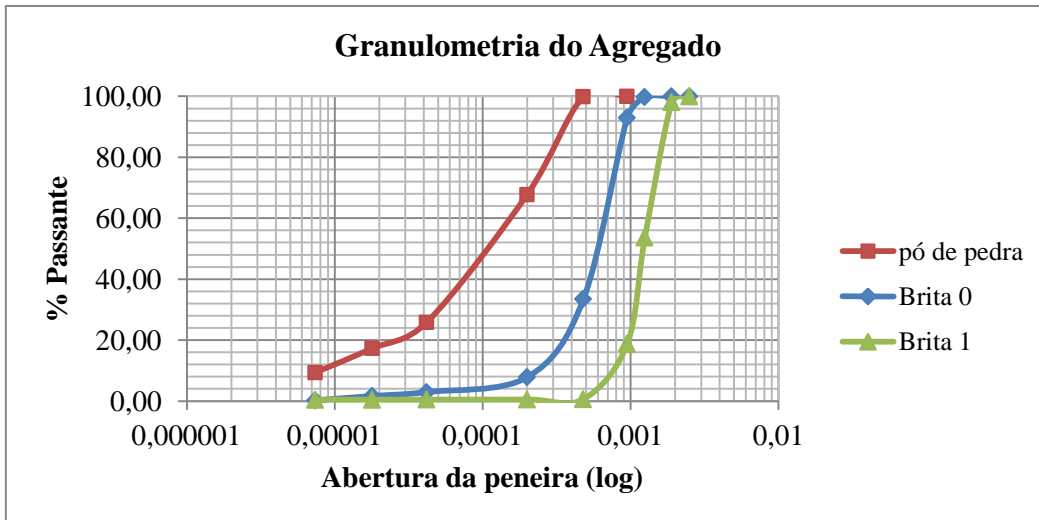


Figura 5.1 – Distribuição da granulometria dos agregados a serem utilizados nas misturas asfálticas.

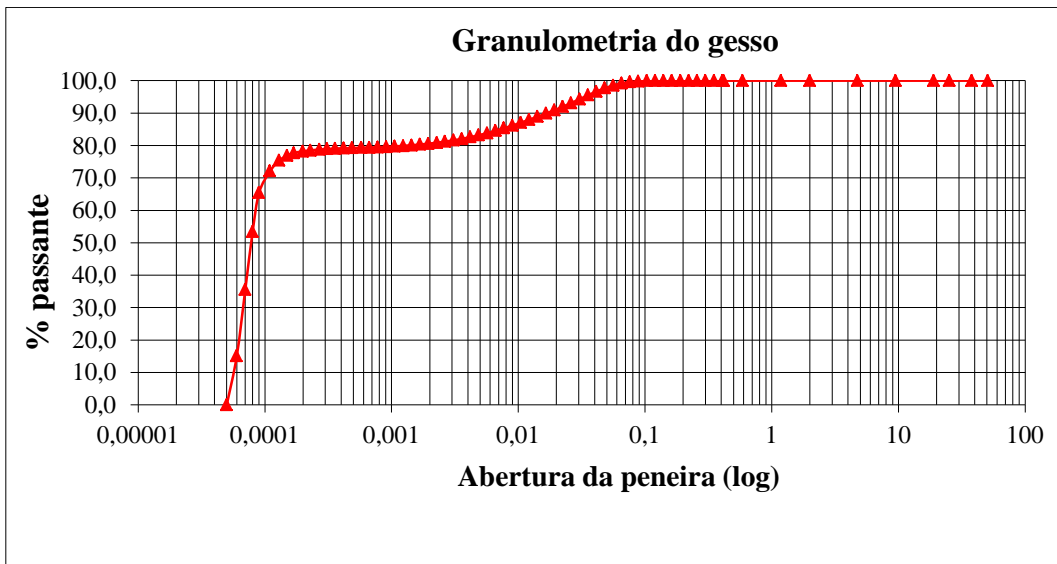


Figura 5.2 – Distribuição da granulometria do gesso (fíler).

5.1.2 Densidade e Absorção dos materiais

A determinação das densidades dos agregados é fundamental para a determinação do teor de projeto a ser utilizados em quaisquer misturas asfálticas. Na Tabela 5.1 estão apresentados valores de densidade determinados para os agregados e fíleres estudados.

Tabela 5.1 – Valores para a densidade e absorção.

Propriedades Físicas	Agregado Graúdo (retido na peneira n.º. 4)	Agregado miúdo (passa na n.º. 4 e retém na n.º.200)	Fíler calcário (passante na peneira n.º. 200)	Fíler gesso (passante na peneira n.º. 200)
Massa específica real (g/cm³)	2,70	2,67	2,40	2,20
Absorção (%)	0,37	-	-	-

5.1.3 Ensaio de equivalente de areia

Para que um agregado miúdo possa ser utilizado em concreto asfáltico, o equivalente de areia deve ser de pelo menos 55%. Os resultados encontrados para as frações passantes na peneira de abertura 4,8 mm confirmaram que os materiais praticamente não contém fração argila, atendendo ao limite mínimo de 55%: pó de brita (97%) e brita zero e brita 1 (99%).

5.1.4 Ensaio de Abrasão *Los Angeles*

O ensaio de abrasão foi realizado para os agregados brita zero e brita 1. A amostra tomada para brita zero foi enquadrada na graduação C, onde 5000g de material foi submetido ao desgaste na máquina “*Los Angeles*” juntamente com carga abrasiva de 8 esferas e submetido a 500 rotações do tambor. Enquanto que para brita 1, utilizou-se 5000g de amostra, com carga abrasiva de 11 esferas (conforme recomendações da DNER-ME 035/98).

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios para a brita zero e brita 1, com valores de 13% e 18%, respectivamente, uma vez que para concreto betuminoso, é desejável um desgaste *Los Angeles* igual ou inferior a 40%, conforme DNER-ES 313/97.

5.1.5 Índice de Forma (f)

Os resultados de “f” obtidos para os agregados brita zero e brita 1 foram 0,55 e 0,67, respectivamente. Segundo Benucci *et al.* (2006) agregados com “f” próximos de 1 traduzem que nenhuma das dimensões prevalece sobre a outra. Agregados com índice de forma próximo a 0,5 são mais lamelares e/ou agudos o que pode implicar em menores resistências sendo mais facilmente quebrados quando sujeitos ao tráfego. É adotado como limite mínimo para aceitação do agregado quanto à forma em aplicações de pavimentação, $f = 0,5$. Logo, observa-se que os valores encontrados para os materiais em estudo são adequados para os devidos fins.

5.1.6 Avaliação da durabilidade dos agregados pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio

Depois de completado o ciclo de imersão e secagem dos agregados submetidos à solução de sulfato de magnésio, as amostras foram peneiradas na série de peneiras especificadas na norma DNER-ME 089-94.

Calculou-se a perda de massa, que é definida como a porcentagem em peso de cada fração da amostra que após o ensaio passou na peneira na qual originalmente era retida, tendo como resultado 4,7%. De acordo com Bernucci *et al.* (2006) a perda de massa resultante desse ataque químico, deve ser no máximo de 12 %.

Partindo para uma análise qualitativa não foram observados problemas do tipo: desintegração, fendilhamento, esmagamento, quebra ou laminagem dos agregados, conforme pode ser visto na Figura 5.3.



Figura 5.3 – Aspecto dos agregados após o ensaio de durabilidade.

5.1.7 Adesividade do agregado ao ligante asfáltico

O método recomendado pela norma DNER-ME 078/94 permitiu avaliar qualitativamente a propriedade de adesividade do ligante asfáltico após a mistura agregados-ligante ser submetida a uma temperatura de 40°C, sob a ação de água destilada, durante 72h.

Ao final do ensaio, visivelmente pôde-se observar que para as amostras de CAP 20% e CAP 40% não houve deslocamento da película de ligante, concluindo-se que a condição de ligante modificado com gesso, nesses percentuais, não prejudicou a aderência entre agregado e ligante, obtendo-se um resultado satisfatório para este ensaio.

No entanto, para as amostras CAP 60%, 80% e 100% foi possível perceber a perda de adesividade pelo deslocamento da película, observada em algumas partículas. O efeito foi mais evidente nas amostras com 80% e 100% de gesso, concluindo-se que para estes teores não foram obtidos resultados satisfatórios.

Faz-se necessário uma análise do referido ensaio em conjunto com outro que avalie o efeito da água em misturas asfálticas. Por exemplo, o ensaio de perda por umidade induzida, uma vez que este complementa o entendimento da propriedade adesividade, devido utilizar de parâmetros mecânicos nos seus procedimentos. Os resultados e discussão dos ensaios de perda por umidade induzida serão apresentados na seção 5.3.4

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam, respectivamente, o aspecto das misturas agregados-ligante após o procedimento de ensaio e a imagem com o detalhe do deslocamento da película de CAP nas partículas, comprovando a diminuição da adesividade entre ligante e agregado.

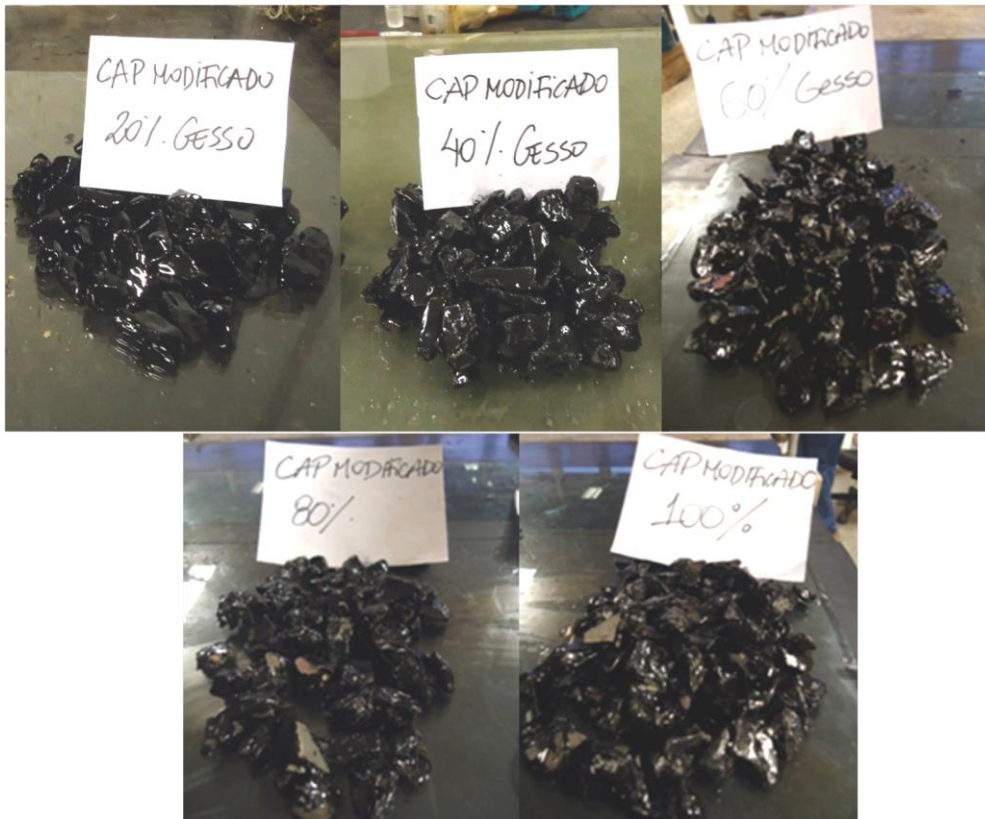


Figura 5.4 - Aspecto dos agregados após o ensaio de adesividade



Figura 5.5 - Aspecto dos agregados com a película de ligante deslocada após o ensaio de adesividade.

Tendo em vista tais resultados, buscou-se avaliar a perda de adesividade dos agregados-ligante a partir da repetição do mesmo ensaio, porém utilizando-se o recipiente sem estar preenchido com água destilada, permitindo assim, verificar a influência da água na mistura quando comparados os dois métodos.

Conforme apresentado na Figura 5.6, os resultados apontaram que após a permanência da mistura em estufa a 40°C, por um período de 72h, os agregados continuaram recobertos pela película de CAP, não apresentando descolamento visível. Este fato induz afirmar que a perda de adesividade, no caso dos ligantes modificados com os maiores teores de gesso (60%, 80% e 100%) está diretamente relacionada à presença da água.

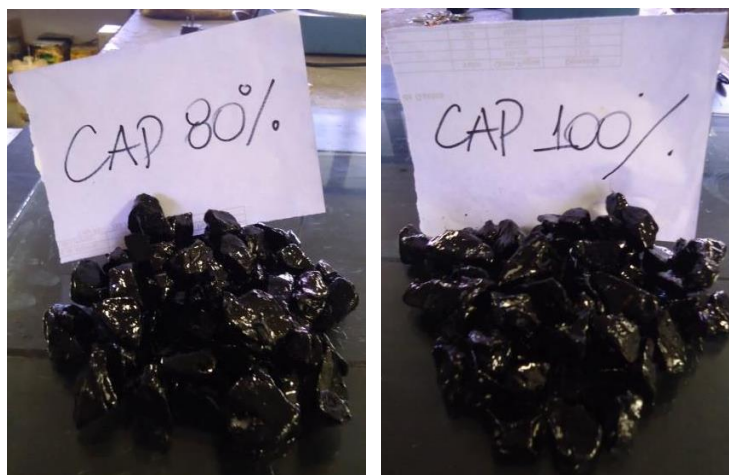


Figura 5.6 - Aspecto das misturas agregados-ligante após permanência em estufa à 40°C, durante 72 h.

5.1.8 Análise mineralógica dos agregados

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam, respectivamente, a composição mineralógica dos agregados brita e pó de pedra. Analisando os difratogramas de raios-X, observa-se pela intensidade dos picos, a maior presença do mineral calcita (CaCO_3), identificando que os agregados utilizados neste trabalho são de origem calcária.

Para as britas 0 e 1, os minerais encontrados foram:

- Quartzo (SiO_2)
- Calcita (CaCO_3)
- Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
- Ilita $(\text{KH}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$
- Montmorilonita $\text{Ca}_{0,2}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- Caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

Para o pó de brita, os minerais identificados foram os mesmos descritos acima, com exceção da dolomita.

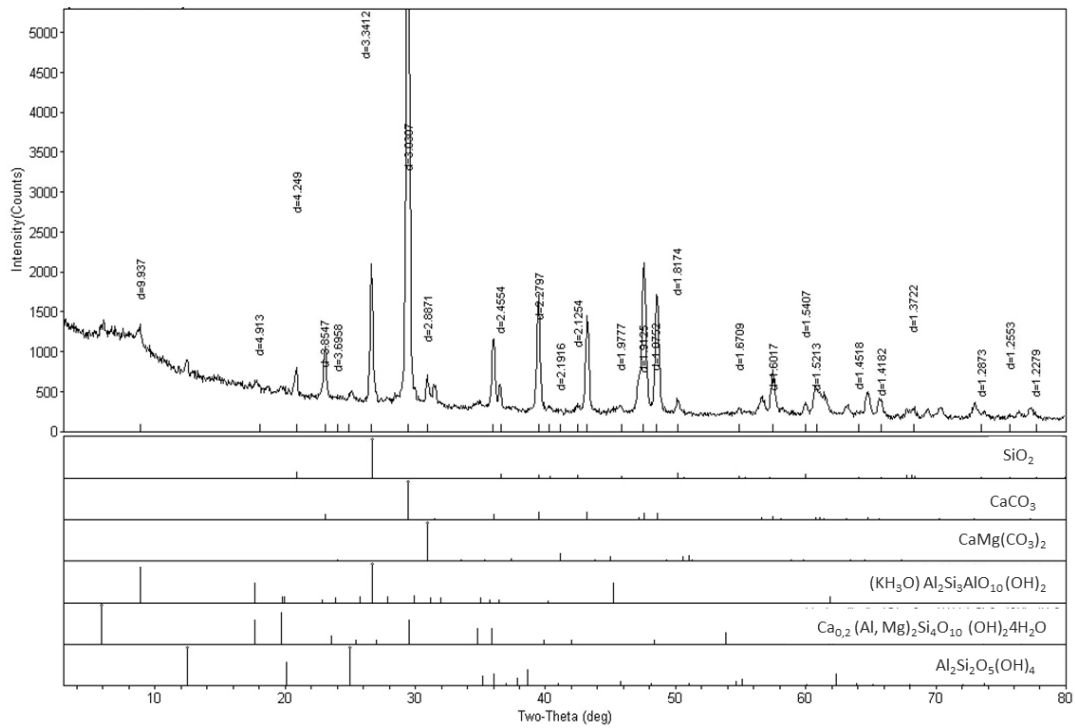


Figura 5.7 – Difratoograma para as amostras de brita zero e brita 1.

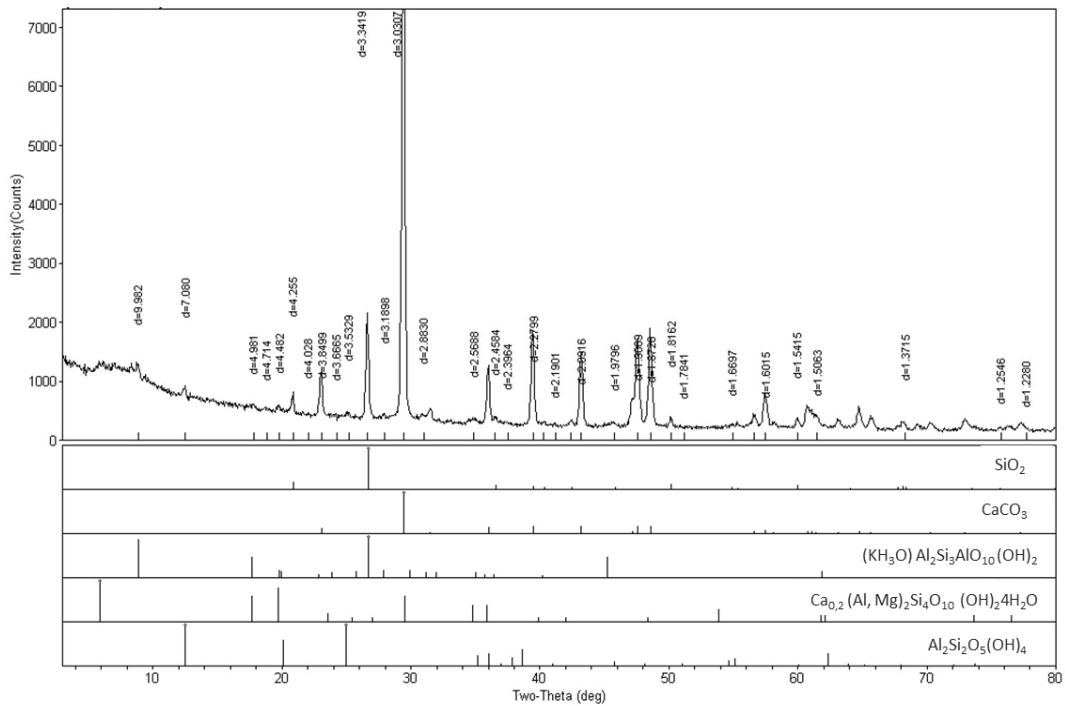


Figura 5.8 – Difratoograma para a amostra de pó de brita

5.1.9 Análise Química e Mineralógica do gesso

Os ensaios de análise química e mineralógica do gesso são importantes para conhecer melhor a composição do material a ser utilizado nas misturas asfálticas. Observa-se na Tabela 5.2 a presença de metais pesados (elementos traços), tais como níquel (Ni) e estrôncio (Sr), elementos já esperados, devido na produção das CGA serem incluídos aditivos (não revelados pelo fabricante).

Entretanto, tais elementos estão presentes em pequeníssimas quantidades na composição do gesso, indicados na tabela em partes por milhão (ppm). Em relação aos elementos maiores, verifica-se o maior percentual do CaO (óxido de cálcio), detectado por essa metodologia.

Para complemento da análise da composição do gesso, foi realizado o ensaio DR-X, no qual foram identificados basicamente os seguintes minerais: sulfato de cálcio anidro (CaSO_4), sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), calcita (CaCO_3) e magnesita (MgCO_3). Observa-se pela intensidade dos picos, na Figura 5.9, a maior presença do mineral gesso (gipsita), confirmando a predominância do mesmo na composição das CGA.

Tabela 5.2 – Resultados dos elementos obtidos na amostra de gesso.

Amostra	ELEMENTOS MAIORES (%)											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Perda por calcinação (g)	Total				
1	1,1	0,3	0,3	33,3	<LQ	<LQ	64,6	99,9				
2	1,1	0,3	0,2	30,4	<LQ	<LQ	67,5	99,9				
3	1,1	0,3	0,4	32,1	<LQ	<LQ	65,5	99,9				
4	1,1	0,3	0,2	31,8	<LQ	<LQ	66,1	99,9				
LQ ^a	1,0	0,1	0,1	0,1	1,6	0,1	-	-				
	ELEMENTOS TRAÇOS (ppm)											
	La	Zn	Cr	Co	Zr	Cd	Mn	Ba	Ni	Cu	V	Sr
1	47	12	10	62	3	13	83	48	105	5	15	1104
2	46	9	10	62	3	14	81	46	103	4	15	1098
3	48	7	11	64	3	14	87	52	108	5	15	1183
4	49	7	11	61	3	13	86	51	109	7	16	1188
LQ ^a	2	4	3	17	1	2	1	30	31	1	2	15

^aLD = limite de detecção do aparelho; LQ = limite de quantificação do método, LQ = 10xLD

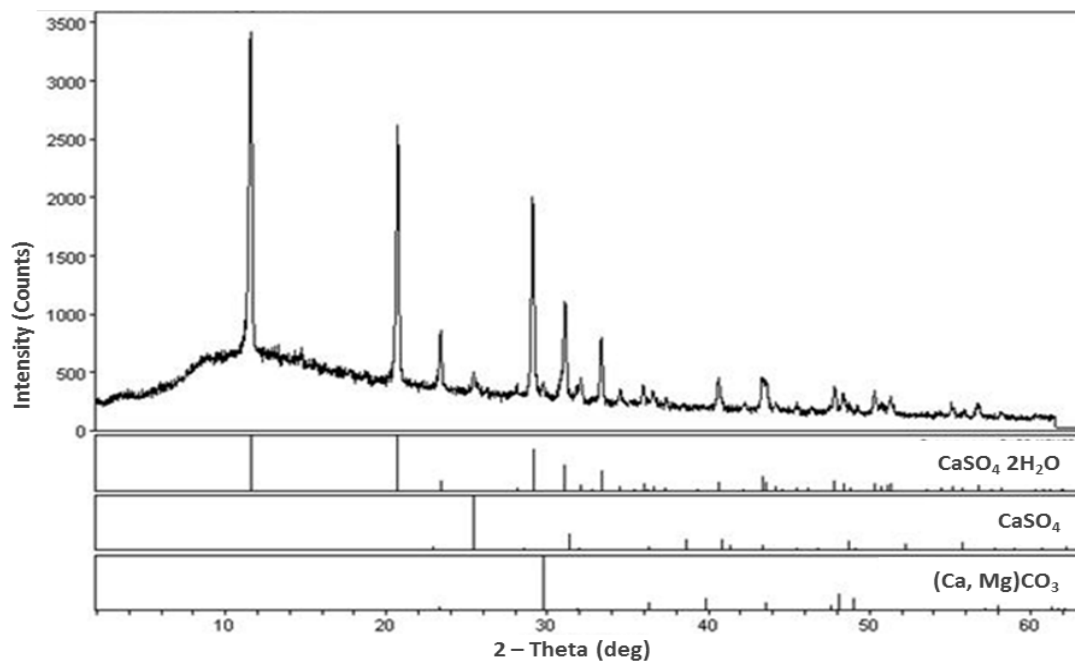


Figura 5.9 - Difratoograma para amostra de gesso.

5.1.10 Análise Térmica Diferencial (ATD) e Gravimétrica (TG) do gesso

Na Figura 5.10 são apresentadas as curvas ATD e TG para o gesso, de onde pode ser observado, basicamente na curva ATD, pico endotérmico na temperatura de 142°C que correspondente à presença de di-hidratado de sulfato de cálcio, ou seja, gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); e perda de massa (PM) com valor máximo igual a 21% na temperatura de 800°C.

Com base no gráfico, verifica-se para a curva TG uma PM equivalente a 19% na temperatura 142°C, correspondente à desidratação de sulfato de cálcio, ou seja, a PM relativa à água de cristalização.

A análise da PM do gesso *versus* temperatura é uma importante informação no que diz respeito à etapa de produção do CA, especificamente no processo de mistura dos materiais, dadas as temperaturas definidas pelo gráfico de viscosidade. Portanto, vale ressaltar que na etapa de pesagem dos agregados (item 4.4.3) foi considerado um percentual de 19% de PM de fíler gesso, valor este acrescido no cálculo da massa de gesso. Este percentual foi escolhido, tendo em vista que as temperaturas de mistura utilizadas, variaram entre 160°C a 177°C.

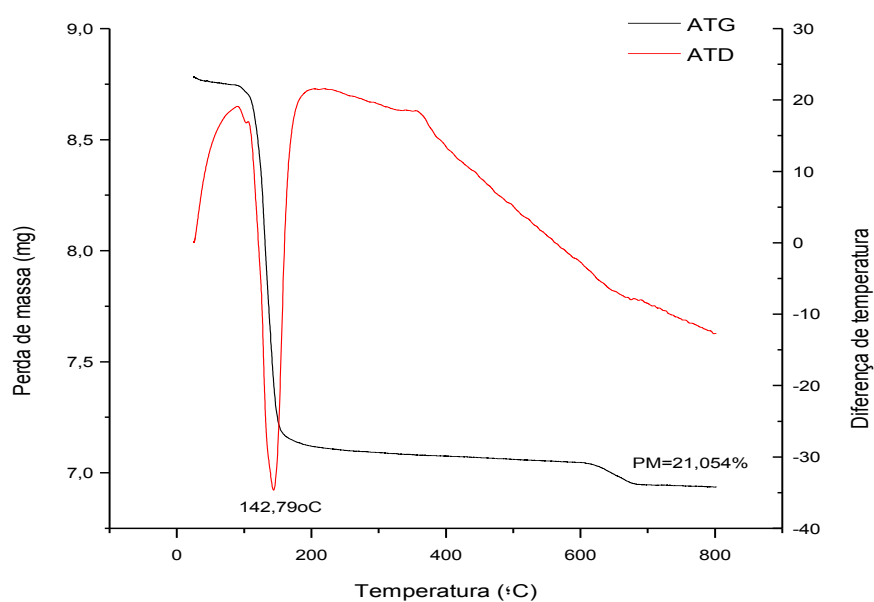


Figura 5.10 – Gráfico das análises térmica diferencial e termogravimétrica do gesso.

5.1.11 Determinação da carga elétrica do filer gesso

Por meio do método de Titulação potenciométrica foram obtidas as cargas superficiais das amostras de gesso, plotadas no gráfico carga *versus* pH (Figura 5.11). O gráfico indica o ponto de carga zero (PCZ), no qual as três curvas do pH se encontraram, dada as diferentes forças iônicas (concentrações de KCl), o que significa dizer que naquele ponto, a carga superficial do gesso é nula. Entretanto, a informação mais relevante para esta pesquisa, trata da caracterização das cargas que o material apresenta.

Logo, concluiu-se que o gesso em questão, tem predominância de cargas eletronegativas (iônicas). Cargas positivas foram encontradas, porém pouco expressivas. Ressalta-se que, durante os testes, constatou-se que o material apresentou comportamento bastante reativo, percebido por alguns pontos em que o pH não alcançava o equilíbrio, findado os três dias de ensaio. Portanto, pontos mais estáveis, foram utilizados na construção das curvas, e assim, indicaram valores predominantemente de cargas negativas.

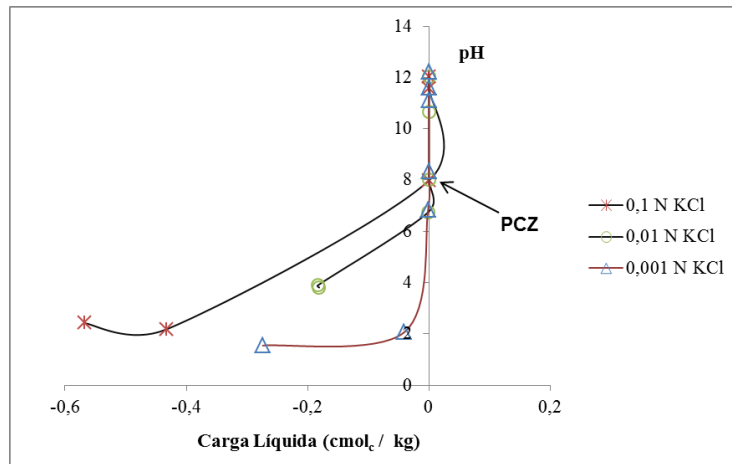


Figura 5.11 – Gráfico carga líquida versus pH de amostras de gesso.

Esta informação é interessante no ponto de vista da influência das cargas elétricas no comportamento da adesividade entre agregado e ligante. Benucci *et al.*, 2006 comenta que minerais nas partículas de agregados apresentam seus átomos dispostos em uma rede cristalina, onde os átomos da superfície exercem atração sobre átomos de gases, líquidos ou sólidos que com ela tenham contato, promovendo a adsorção química. Essa adsorção é o principal fator na adesividade entre o agregado e os ligantes asfálticos.

A maioria dos agregados silicosos tais como arenito, quartzo e cascalho torna-se negativamente carregada na presença de água, enquanto materiais calcários conduzem carga positiva na presença de água.

Analisando a relação agregados-ligantes modificados com gesso, tem-se que, a carga do gesso é de natureza iônica, enquanto que os agregados calcários tornam-se positivamente carregados na presença de água. Isto pode induzir a uma tendência de boa adesividade entre os materiais. Entretanto, outras propriedades do gesso devem ser analisadas para inferir maiores conclusões da influência do mesmo na combinação agregado-ligante modificado.

5.1.12 Determinação da expansibilidade do fíler gesso

Os resultados do ensaio demonstraram que o gesso, sob saturação, apresentou uma pequena variação vertical de 0,4%, verificada após 24h. A Tabela 5.3 contém os valores das dimensões do anel, que é a mesma da amostra, antes e após o ensaio, indicando que ocorreu o aumento de “h”.

Tabela 5.3 - Valores das dimensões da amostra, antes e após o ensaio.

	h (cm)	A (cm²)	V (cm³)	Varição (%)
Antes da imersão	0,18356	0,19792	0,03633	0,4
Após a imersão	0,18436	0,19792	0,03649	

Desta forma, a presença de gesso nas misturas asfálticas pode propiciar expansão, quando submetido à condição saturada. O valor de 0,4% aparentemente é irrelevante, porém, se pensarmos neste material, inserido dentro da mistura compactada (revestimento asfáltico), os efeitos podem ser danosos.

Observações do fenômeno de expansão foram constatadas, no ensaio de umidade induzida, onde os CPs foram condicionados à saturação em água, à 60°C. Após o ensaio, os CPs contendo 80% e 100% de gesso, apresentaram aspecto mais “inchado” e desagregação das partículas (ver item 5.3.4).

5.2 RESULTADOS E ANÁLISES DAS PROPRIEDADES DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Foi objetivo deste trabalho também, avaliar o efeito do gesso adicionado ao ligante, executando assim, vários ensaios para a determinação de suas propriedades. Na Tabela 5.4 estão apresentados todos resultados obtidos e as especificações requeridas para o CAP 50/70 de acordo com a ANP (2005). A seguir cada uma das propriedades serão analisadas e discutidas.

Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios físicos para CAPs modificados e especificações requeridas para o do CAP natural, segundo ANP.

Ensaio	Unidades	Teores						
		CAP 50/70 (ANP)	CAP 0%	CAP 20%	CAP 40%	CAP 60%	CAP 80%	CAP 100%
Penetração (100g,5s,25°C)	0,1mm	50-70	52,75	43,83	34,25	21,00	15,75	13
Ponto de amolecimento	°C	46	46,5	51	53,5	55	58	66,5
Viscosidade Brookfield								
a 135 °C, sc 21 (20 rpm)	cP	274	385	500	1205	1700	2990	4200
a 150 °C, sc 21 (20 rpm)	cP	112	170	315,00	578,00	690	1380	2300
a 177 °C, sc 21 (20 rpm)	cP	57-285	60	98	205	300	490	650
IST	-	(-1,5) a (+0,7)	-1,99	-1,24	-,1,17	-1,74	-1,63	-0,11
Ponto de combustão	°C	NA	385	338	352	370	372	382
Ponto de fulgor	°C	>235	325	320	336	342	360	376
Densidade CAP	-	NA	1,0038	1,1148	1,2151	1,2674	1,3607	1,4387
Ductilidade a 25° C	cm	≥60	100	40,5	18,90	25,20	18,90	9
<i>Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min</i>								
Varição em massa	% massa	≤0,5	0,17%	0,64%	1,03%	4,33%	4,33%	4,73%
Ductilidade a 25° C	cm	≥20	100	37	23	20,60	11	7
Aumento do ponto de amolecimento	°C	≤ 8	1,50	4,25	5,75	7	7,25	8,5
Penetração retida	%	≥55	69%	67%	70%	76%	79%	87%

5.2.1 Ensaios de penetração e Ponto de Amolecimento

Nos ensaios de penetração e ponto de amolecimento, as amostras apresentaram comportamento já esperado para ligantes modificados; redução da penetração e consequentemente, aumento do ponto de amolecimento, causados pelo acréscimo do teor de gesso. A adição de gesso ao ligante promoveu o aumento da sua consistência. As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam os resultados obtidos nos ensaios, confirmando esta tendência de comportamento.

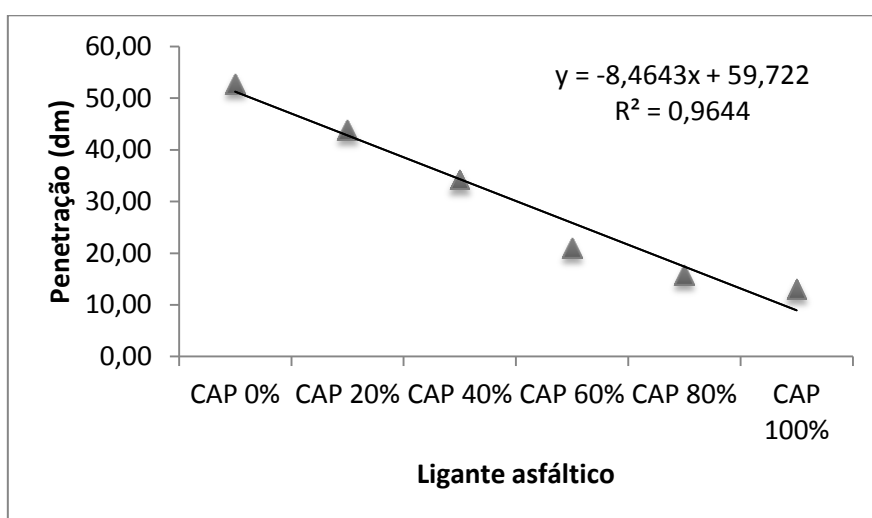


Figura 5.12 – Resultados dos ensaios de penetração.

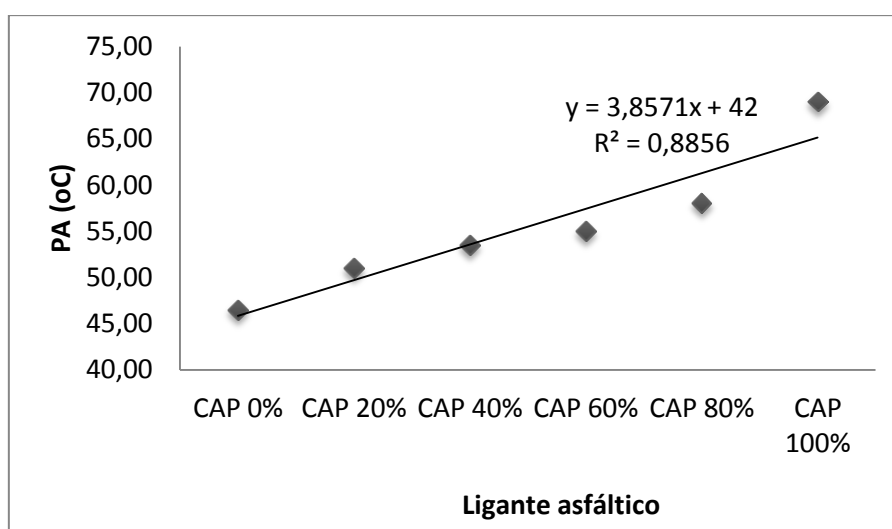


Figura 5.13 - Resultados dos ensaios de ponto de amolecimento.

5.2.2 Ensaio de Viscosidade

O ensaio de viscosidade indicou que o gesso, em todos os teores implicou no aumento desta propriedade. Em outras palavras, a adição deste material aumentou a viscosidade do ligante, devendo-se este acréscimo à ação do gesso como um fíler ativo, que altera a consistência do ligante no mástique (Figura 5.14). Verifica-se um aumento mais acentuado da viscosidade quando o teor de gesso é acrescido de 60% para 80% e de 80% para 100%.

Vale comentar que o aumento da viscosidade, até certo ponto representa um aspecto positivo, pois propicia a formação de um filme de ligante mais espesso envolvendo o agregado mineral colaborando para maiores resistências ao envelhecimento além de melhorar a suscetibilidade térmica desse material diante das oscilações climáticas.

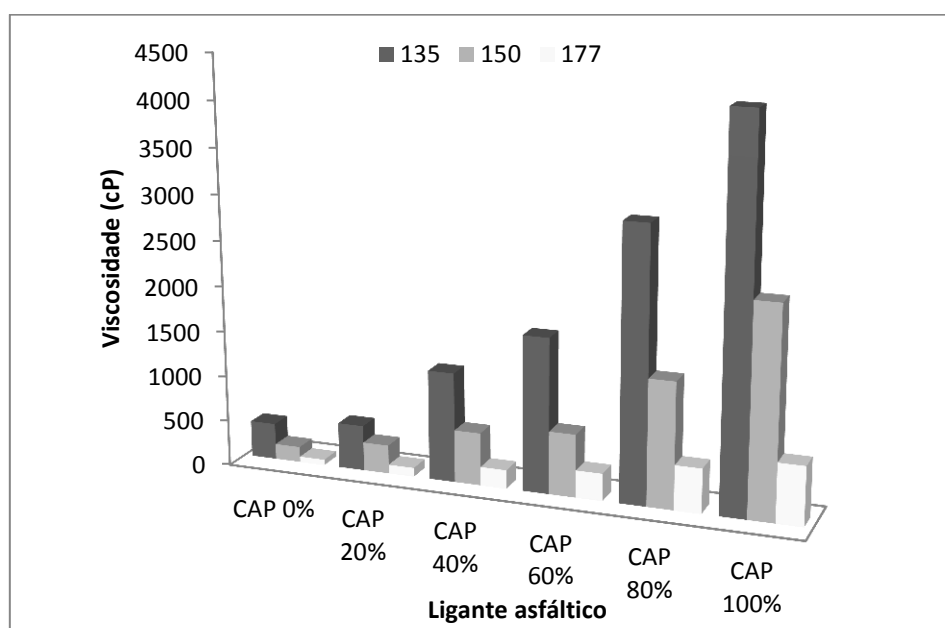


Figura 5.14 – Efeito do fíler gesso na viscosidade dos ligantes, nas temperaturas 135 °C, 150 °C e 177°C.

No caso do gesso acartonado, existe a presença de fibras de vidro em seu interior, e isto de certa forma, proporcionou um incremento maior na consistência dos CAPs. Este fato pôde ser percebido visualmente, quando da manipulação dos ligantes modificados na realização dos ensaios laboratoriais e ratificado através das curvas de viscosidade.

A Figura 5.15 , exemplifica o aspecto de uma amostra de CAP modificado com 100% de adição de gesso, à temperatura de 135°C.



Figura 5.15 – Aspecto da viscosidade do CAP 100% à temperatura de 135°C.

Outro efeito observado está relacionado com a influência da temperatura, pois à medida que a temperatura se eleva, a viscosidade tende a diminuir. As curvas de viscosidade, apresentadas na Figura 5.16, indicam facilmente este comportamento.

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), esse comportamento ocorre porque em temperaturas muito baixas as moléculas não têm condições de se mover umas em relação às outras e a viscosidade fica muito elevada. Nessa situação o ligante se comporta quase como um sólido. À medida que a temperatura aumenta, algumas moléculas começam a se mover podendo mesmo haver um fluxo entre as moléculas. O aumento do movimento faz baixar a viscosidade, e em temperaturas altas, o ligante se comporta como líquido.

A medida da viscosidade do ligante é um parâmetro utilizado na determinação da consistência adequada que ele deve apresentar, quando da mistura com os agregados visando uma total cobertura dos mesmos. Desta forma a norma DNER-ME 043/95 define limites de viscosidade cinemática para o CAP na etapa de mistura com os agregados e etapa de compactação, sendo estes respectivamente 170 ± 20 cSt e 280 ± 30 cSt. Esses limites estão identificados na Figura 5.16.

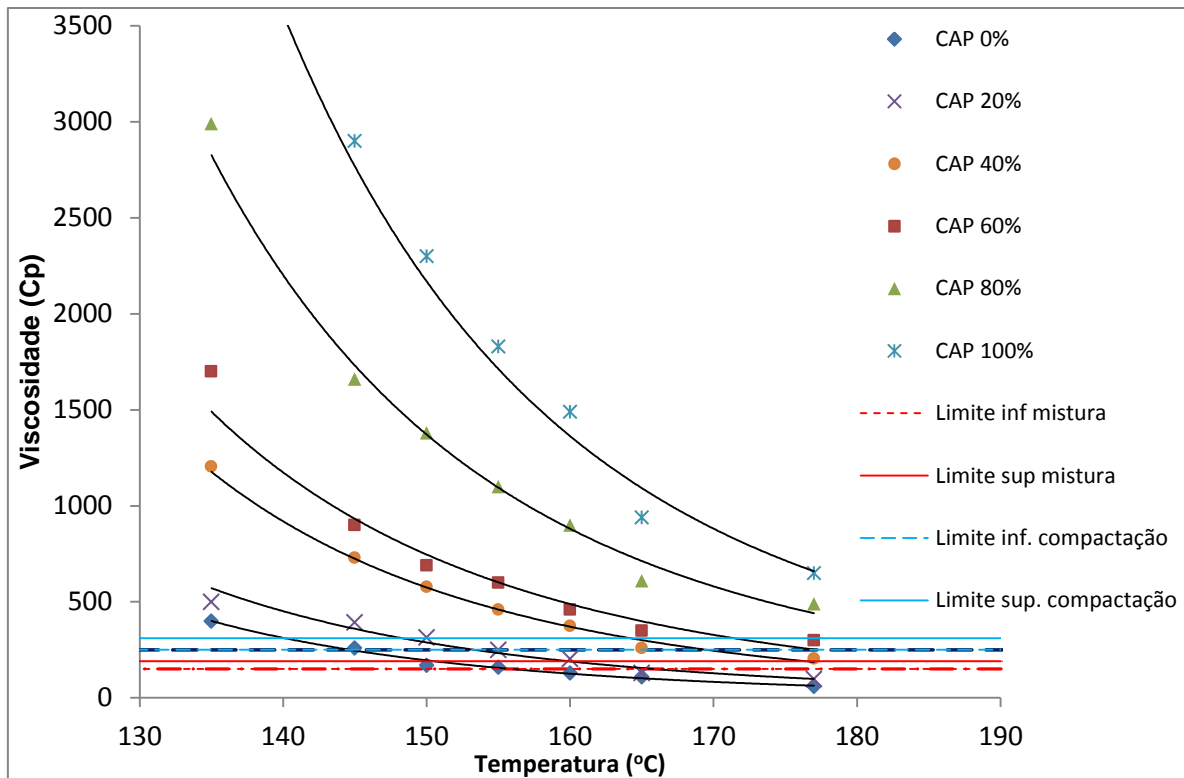


Figura 5.16 – Curvas viscosidade *versus* temperatura definidas para os ligantes natural e modificados.

Examinando cada uma das curvas do gráfico, foi possível identificar as faixas de temperaturas recomendadas pela DNER-ME 043/95, tanto para a etapa de mistura, quanto para a de compactação dos CPs. Essas informações já foram apresentadas na Tabela 4.7 na etapa de definição das temperaturas de trabalho para a produção dos CPs.

Verificou-se que CAP 20% e CAP 40% se enquadram nas faixas recomendadas pela DNER-ME 043/95, o que não ocorreu para os demais teores. Logo, para evitar que as temperaturas de trabalho fossem além do limite máximo de 177°C para CAP 60%, 80% e 100%, utilizou-se a maior temperatura, (aproximadamente 177°C), prolongando os tempos de misturas dos materiais (em torno de 3 minutos), para garantir o máximo recobrimento dos agregados pelos CAPs modificados.

Nota-se que quanto maior o teor de gesso no CAP, maiores são as temperaturas necessárias para a mistura e compactação dos corpos de prova a serem moldados.

Neste sentido, Bernucci *et al.*(2006) comenta que o CAP não deve ser utilizado a temperaturas maiores do que 177°C, pois a altas temperaturas o CAP perde óleos voláteis incorporando moléculas de oxigênio. Isso faz com que ocorra um aumento na consistência original (oxidação e endurecimento), prejudicando o desempenho do material.

5.2.3 Ensaio de DSR

O ensaio de cisalhamento dinâmico foi realizado com o objetivo de determinar parâmetros indicativos do comportamento do material frente às deformações permanentes. Os resultados do módulo de cisalhamento complexo (G^*), apresentados na Figura 5.17 indicam que para maiores teores de gesso, ocorre um aumento desse parâmetro, ou seja, denotam que o material possui maior rigidez.

Ainda, com o aumento da temperatura, obtêm-se menores valores de G^* , constatando-se que às temperaturas baixas, o ligante se comporta essencialmente como um sólido elástico. Com o aumento da temperatura, a propriedade de viscoso torna mais evidente.

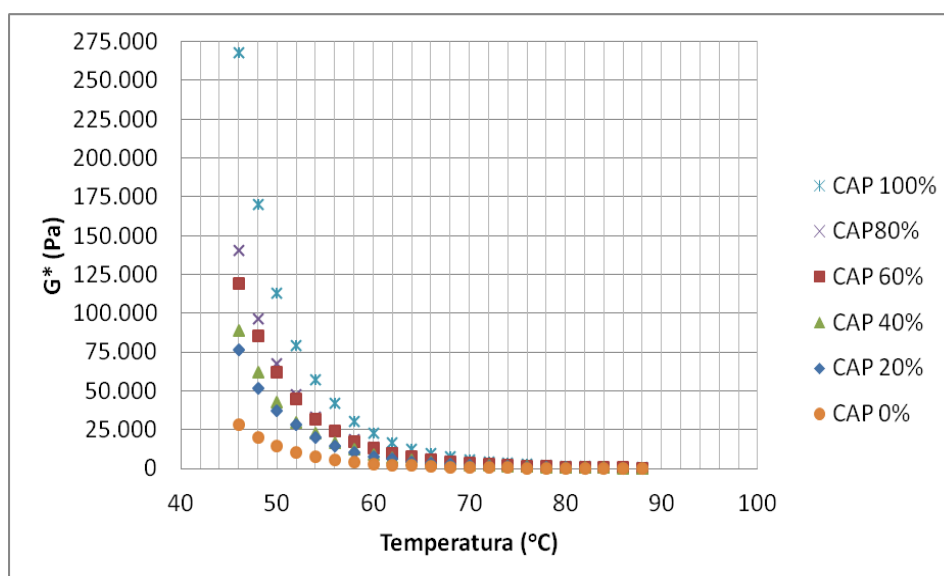


Figura 5.17 – Módulo complexo (G^*) em função da temperatura dos ligantes.

O parâmetro $G^*/\sin\delta$ é associado à deformação permanente que ocorre em pavimentos asfálticos. Logo, a partir da análise da Figura 5.18, verificou-se que as adições de fíler gesso, contribuíram para o aumento da resistência à deformação permanente dos asfaltos estudados.

De acordo com o método SUPERPAVE, são estabelecidos valores mínimos para $G^*/\sin\delta$, capazes de garantir adequada resistência ao acúmulo de deformação permanente por parte do ligante. Sendo assim este parâmetro também foi avaliado, visto que atendeu aos limites estabelecidos; $G^*/\sin\delta > 1$ KPa para o ligante natural e $G^*/\sin\delta > 2,0$ KPa para o ligante após ter sido submetido ao ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFOT).

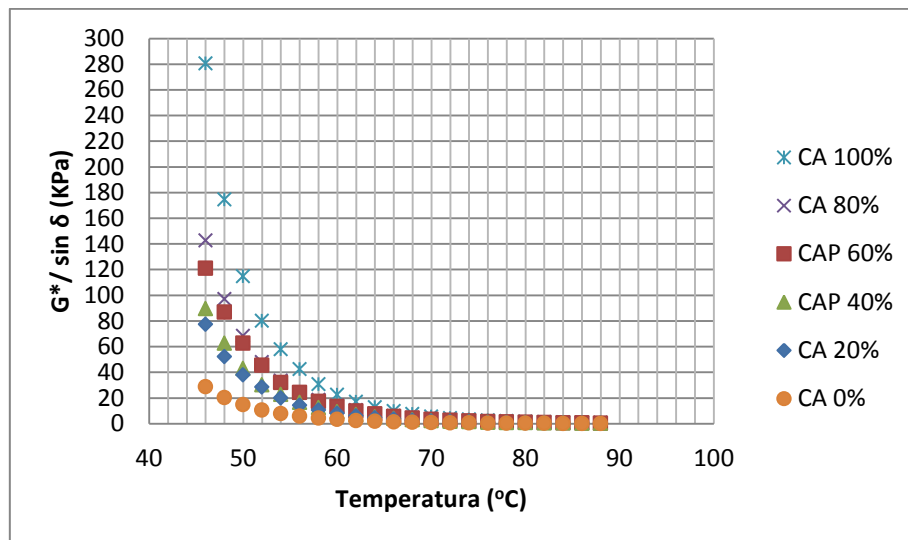


Figura 5.18 – Módulo complexo $G^*/\sin\delta$ em função da temperatura dos ligantes.

Outra análise de resultados obtidos no DSR está relacionada com a variação do módulo complexo (G^*) e o ângulo de fase *versus* o teor de gesso presente nas amostras. Por meio da Figura 5.19, nota-se que o CAP 100% obteve o melhor comportamento, em comparação com as demais amostras, conferindo ao CAP simultaneamente, maior rigidez (G^*) e melhora no comportamento elástico, percebida pela redução do ângulo de fase (δ). Observa-se também que além do CAP 100%, melhor elasticidade foi detectada para todos os teores modificados, em relação ao CAP 0%.

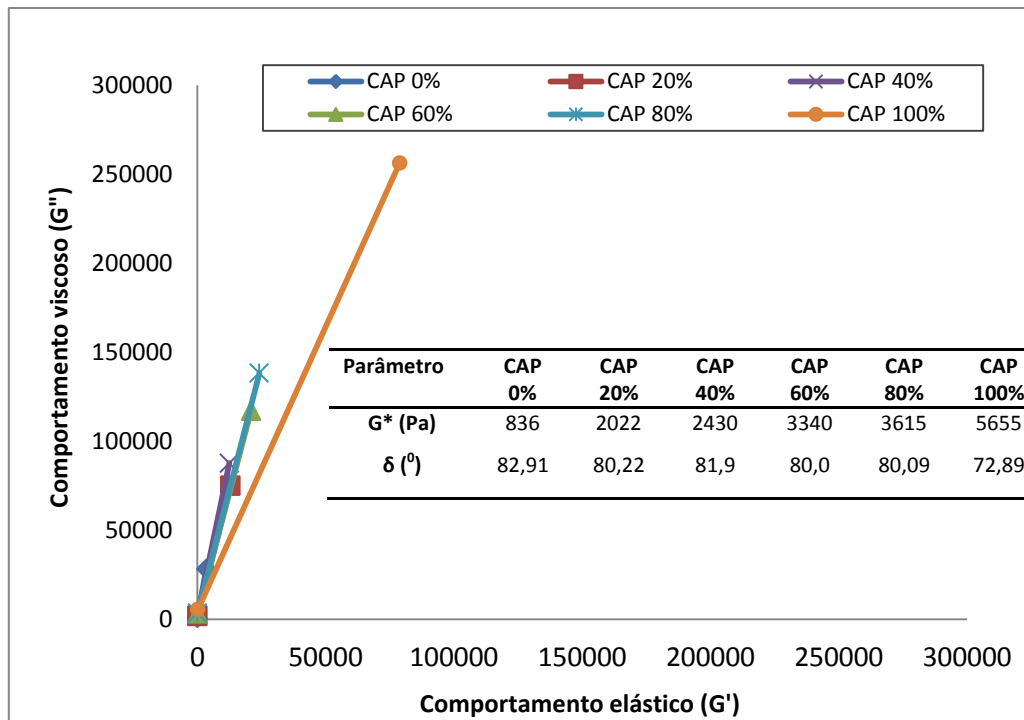


Figura 5.19 – Ângulo de fase (δ) em função da temperatura dos ligantes.

Ressalta-se que um bom equilíbrio entre rigidez e elasticidade é importante para assegurar bons desempenhos, tanto a altas quanto a baixas temperaturas, que confira flexibilidade ao betume suficiente para que ele não “rache” a baixa temperatura e rigidez suficiente para que ele não flua a altas temperaturas (LU & ISACSSON, 1998; CHOQUET, 1993).

5.2.4 Efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional (RTFOT)

Os efeitos do calor e do ar em uma película de material asfáltico são observados a partir das variações nos valores dos ensaios físicos realizados antes e após o processo na estufa de envelhecimento. Foram avaliados: (a) variação de massa da amostra; (b) aumento do ponto de amolecimento; (c) penetração retida; (d) índice de suscetibilidade térmica e (e) ductilidade.

5.2.4.1 Variação de massa

Após o ensaio de RTFOT, o resíduo de ligante contido no frasco foi pesado para que se determinasse a percentagem de perda ou ganho de massa após o processo de envelhecimento. Observou-se que a variação de massa foi negativa para todos os teores, ou seja, houve perda de massa.

Observou-se também que à medida que o teor de gesso se elevava, maior era a perda de massa. Este comportamento já era esperado, uma vez que conforme apresentado no ensaio de ATG (item 5.1.10), o gesso em estudo, quando submetido à altas temperaturas, sofre desidratação diminuindo a sua massa. A perda de massa foi de aproximadamente 19% na temperatura de 142°C, sendo que a temperatura de ensaio utilizada para o RTOF é fixada em 163°C.

Comparando com a especificação estabelecida pela ANP, tem-se que todas as amostras contendo gesso apresentaram variação de massa maior do que o limite desta norma (variação $\leq 0,5\%$) (Figura 5.20). Entretanto, é válido comentar que os limites da ANP (Tabela 6.3) serão utilizados apenas a título de comparação, não sendo parâmetro de descarte ou aceite dos valores obtidos das propriedades físicas dos ligantes modificados estudados.

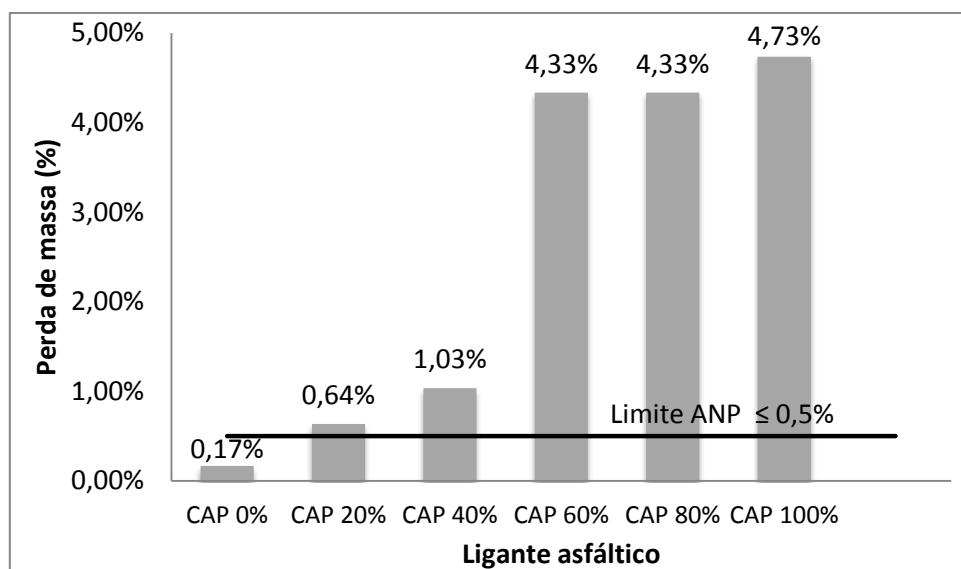


Figura 5.20 – Resultados da variação de massa após ensaio de envelhecimento das amostras (RTFOT).

5.2.4.2 Penetração , Aumento do ponto de amolecimento e Penetração retida

Os resultados indicaram que quando as amostras são envelhecidas, os valores da penetração diminuem, enquanto que os resultados do ponto de amolecimento aumentam. As Figuras 5.21 e 5.22 traduzem esse comportamento, através do deslocamento da linha para baixo, no caso do ensaio de penetração, e do deslocamento da linha para cima, no caso do ensaio do ponto de amolecimento.

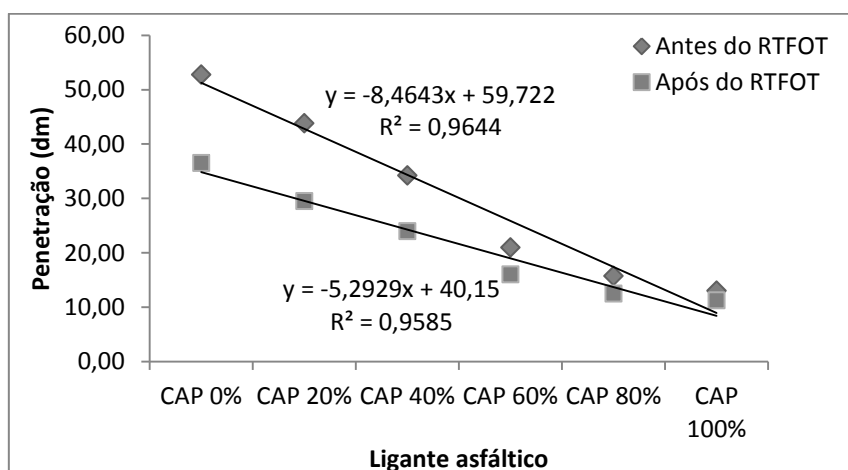


Figura 5.21 – Variação dos resultados dos ensaios de penetração, antes a após RTFOT.

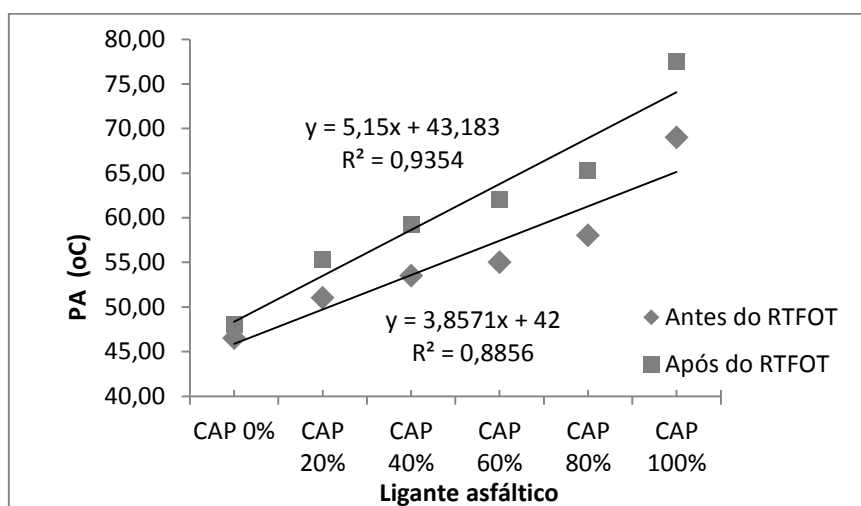


Figura 5.22 - Valores do ensaio de ponto de amolecimento, antes e após RTFOT.

Este comportamento pode ser explicado devido às transformações físicas que ocorrem no cimento asfáltico, no caso, a oxidação de moléculas polarizáveis dos maltenos, que se tornam polares e passam a fazer parte da fração asfalteno aumentando a consistência do asfalto (Amaral, 2000).

Os asfaltenos têm grande efeito nas características reológicas do CAP: quanto maior o percentual de asfaltenos, mais duro e mais viscoso será o ligante asfáltico (embora se deva considerar ainda a forma dos asfaltenos, sendo maior o seu efeito sobre a reologia quanto mais esférica for a partícula) (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Tonial (2001) explica ainda que, em contato com o ar o ligante oxida-se lentamente, grupos polares oxigenados tendem a associar-se, formando micelas de alto peso molecular e com isso ocorre um aumento na viscosidade do asfalto (e conseqüentemente diminuição da penetração). O processo de envelhecimento se manifesta, devido a reações químicas que acontecem com essas frações, ou seja, uma diminuição do teor de aromáticos, que se transforma em resina, que por sua vez em parte, se transforma em asfaltenos.

O efeito do envelhecimento causa o aumento do ponto de amolecimento do ligante, entretanto, este valor não deve ser maior que 8°C para ligantes naturais, segundo especificações da ANP. Conforme apresentado na Figura 5.23 o aumento do PA foi crescente, de acordo com a adição de gesso. Contudo, apenas CAP 100% apresentou valor maior do que 8%, sendo que CAP 60% e CAP 80% se aproximaram desse valor limite.

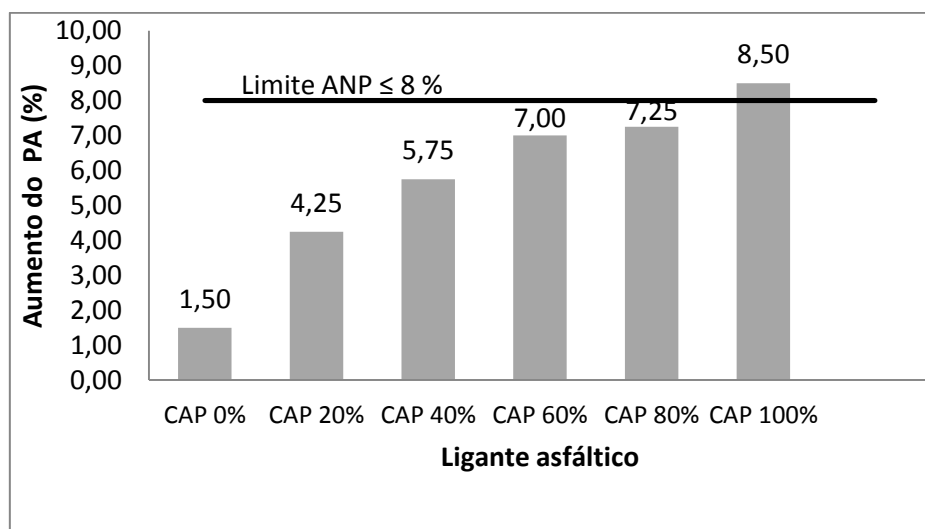


Figura 5.23 – Resultados do ensaio de ponto de amolecimento após envelhecimento das amostras (RTOFT).

Além da comparação da penetração antes e após processo de envelhecimento, foi verificada a percentagem da penetração retida, que corresponde a razão entre as penetrações antes e após o efeito do envelhecimento no CAP. Apenas para efeito de comparação, a ANP recomenda valores de penetração retida de, no mínimo 55%, o que ocorreu para todos os teores modificados (Figura 5.24).

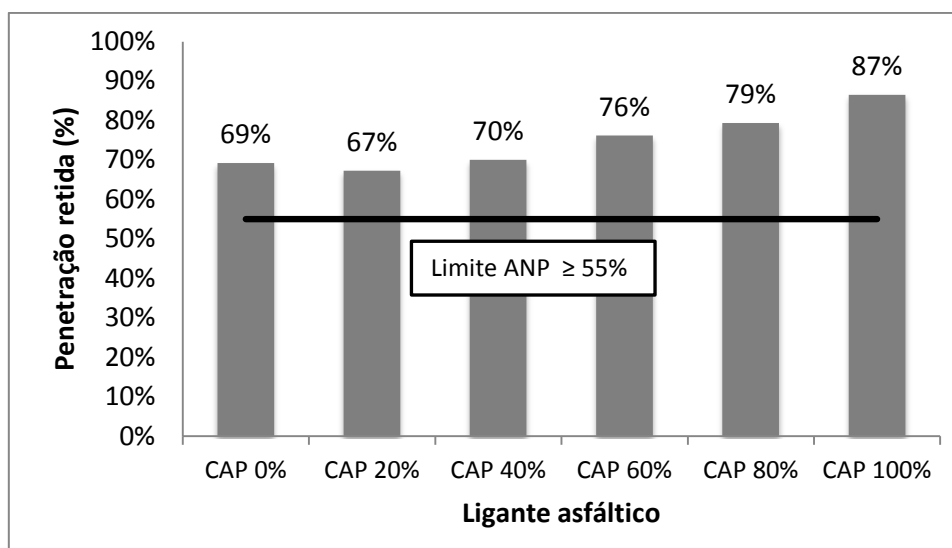


Figura 5.24 – Valores para a penetração retida após RTFOT.

5.2.4.3 Índice de suscetibilidade térmica (IST)

Várias propriedades do CAP variam muito com a temperatura, por isso, investigar a característica de suscetibilidade térmica de cada ligante é muito importante para o comportamento do futuro pavimento. Se os ligantes asfálticos forem muito suscetíveis à variação de estado ou propriedades frente à variação de temperatura, não serão desejáveis na pavimentação.

É desejável que o ligante apresente variações pequenas de propriedades mecânicas, nas temperaturas de serviço dos revestimento para evitar grandes alterações de comportamento frente às variações de temperatura ambiente. Segundo Bernucci *et al.* (2006) valores de índice de suscetibilidade térmica (IST) maiores que +1 indicam asfaltos oxidados (pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços, em temperaturas mais baixas) e valores menores que (-2) indicam asfaltos muito sensíveis à temperatura.

A Tabela 5.5 apresenta os valores calculados pela fórmula descrita no item 3.2.2.3.

No caso da avaliação dos ligantes no estado natural, antes do RTFOT, verifica-se que todos os teores, se enquadram na faixa de asfaltos muito sensíveis à temperatura. Quando comparado os valores obtidos antes e após RTFOT, ocorre a diminuição do IST para os ligantes com adição de gesso, indicando uma tendência de melhoria desta propriedade, quando as amostras passam por um processo de envelhecimento.

Tabela 5.5 - Resultados para o IST antes e após processo de envelhecimento.

	CAP 0%	CAP 20%	CAP 40%	CAP 60%	CAP 80%	CAP 100%
Antes RTFOT	-1,99	-1,24	-1,17	-1,74	-1,63	-0,11
Após RTFOT	-2,33	-1,09	-0,69	-0,89	-0,75	0,86

Contudo, por se tratar de um cálculo empírico, procedeu-se à análise do gráfico linear da viscosidade (cP) *versus* a temperatura absoluta (°R) (Figura 5.25), buscando obter um melhor entendimento do comportamento dos ligantes frente às mudanças de temperatura.

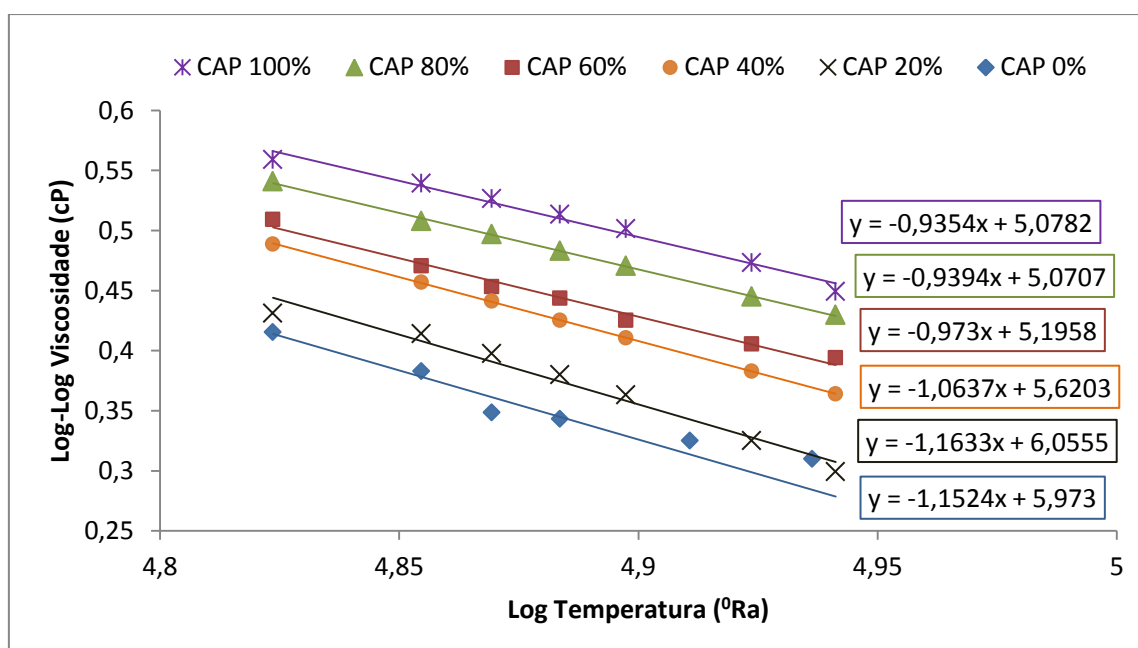


Figura 5.25 – Resultados dos ensaios de viscosidade *Brookfield* (Log-log Viscosidade *versus* Log Temperatura).

O gráfico permite observar a maior ou menor suscetibilidade térmica do ligante asfáltico, conforme a inclinação da reta em relação ao eixo X. Quanto maior o ângulo entre a reta e o eixo das abcissas, mais inclinada é a reta, indicando neste caso, que o ligante é mais suscetível termicamente. A Tabela 5.6 apresenta os valores dos ângulos determinados para cada reta, possibilitando a visualização da variação das inclinações entre as mesmas.

Ligantes com adição de gesso demonstraram comportamento menos suscetível termicamente, quando comparados ao CAP 0%. À medida que o teor de gesso aumentava, o valor da suscetibilidade térmica diminuía. Estes resultados são devidos, muito provavelmente, pela condição de maior viscosidade dos ligantes e por isso acabam se tornando menos sensíveis termicamente.

Tabela 5.6 – Ângulo formado entre as retas e o eixo X para cada ligante.

Ligante	Coef. Angular	Ângulo (°)
CAP 0%	1,152	49,0
CAP 20%	1,163	49,3
CAP 40%	1,063	46,7
CAP 60%	0,973	44,2
CAP 80%	0,939	43,2
CAP100 %	0,935	43,0

5.2.5 Ensaio de ductilidade

O ensaio de ductilidade mede indiretamente a coesão do asfalto. Avaliando o comportamento do CAP modificado com gesso, concluiu-se que para todos os teores houve um decréscimo da medida da ductilidade, sendo que o único teor que obteve valor maior do que 60 cm foi o próprio ligante isento de gesso. Apenas em nível de comparação, os valores para ductilidade devem ser maiores do que 60 cm, segundo ANP (2005).

Este decréscimo geralmente é observado em ligantes modificados, devido ao aumento de suas densidades e descontinuidades e quando são ensaiados (tracionados pelo equipamento) rompem mais rapidamente. Entretanto, na prática, provavelmente o asfaltos não serão submetidos a consideráveis deslocamentos, tais como 60 cm.

Após o envelhecimento, o decréscimo dos valores novamente ocorreu, certamente pela oxidação sofrida pelo ligante, o que normalmente os torna mais “quebradiços”. A Figura 5.26 apresenta os resultados dos ensaios de ductilidade, antes e após o processo de envelhecimento.

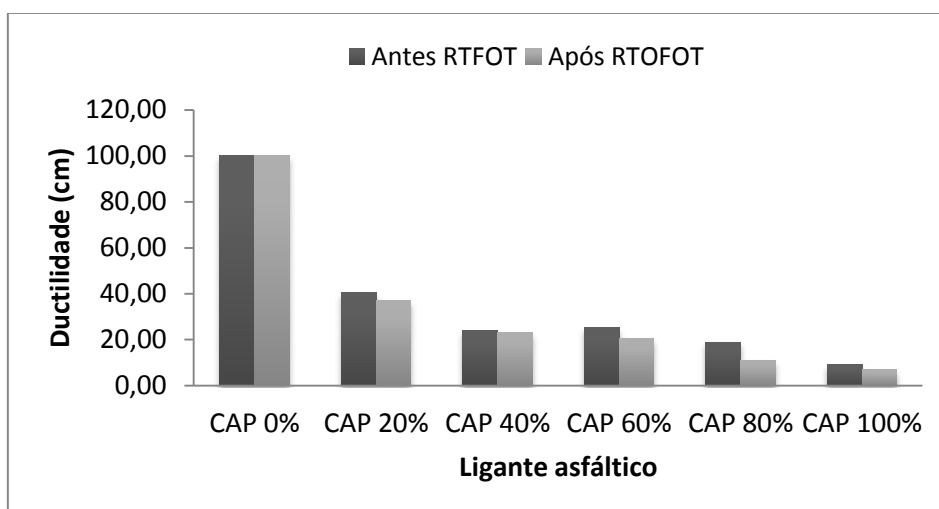


Figura 5.26 – Resultados do ensaio de ductilidade antes e após o processo de envelhecimento (RTFOT) das amostras.

5.2.6 Ensaio de densidade

O ensaio para a determinação da densidade do ligante é importante para fornecer parâmetros a serem utilizados na definição de propriedades volumétricas das misturas. Conforme apresentado na Figura 5.27 a densidade relativa das amostras aumentou, conforme adição do teor de gesso ao ligante asfáltico, ou seja, o CAP 100% apresentou maior densidade relativa do que CAP 80%, este foi maior do que CAP 60% e assim sucessivamente. Pode-se observar também que através do parâmetro R-quadrado os valores foram bem representativos, sem grandes dispersões.

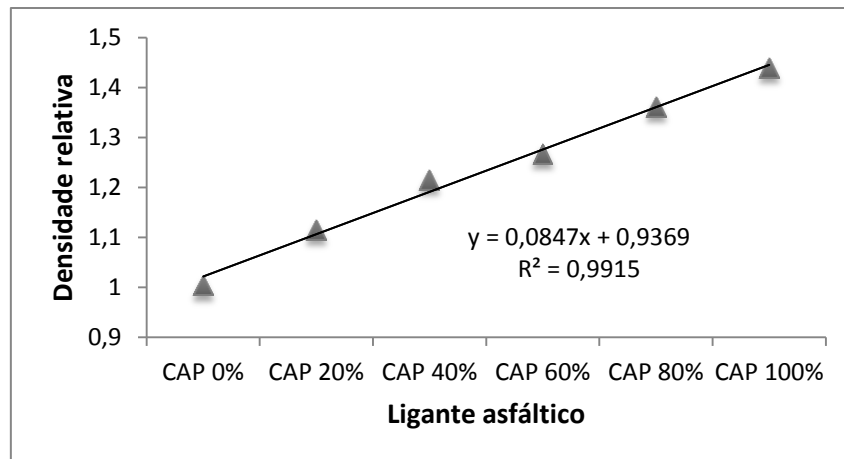


Figura 5.27– Resultados do ensaio de densidade relativa para todo os ligantes (método do picnômetro).

5.2.7 Ensaio de Ponto de fulgor (PF) e Ponto de combustão (PC)

Os Pontos de fulgor (PF) e de combustão (PC) medem em qual temperatura as substâncias tornam-se perigosas ao manuseio, no que diz respeito à sua capacidade de se inflamar. São ensaios ditos de segurança e por isso, foi importante verificar a influencia do gesso nas composições. A Figura 5.28 contempla as temperaturas encontradas para o PF e PC.

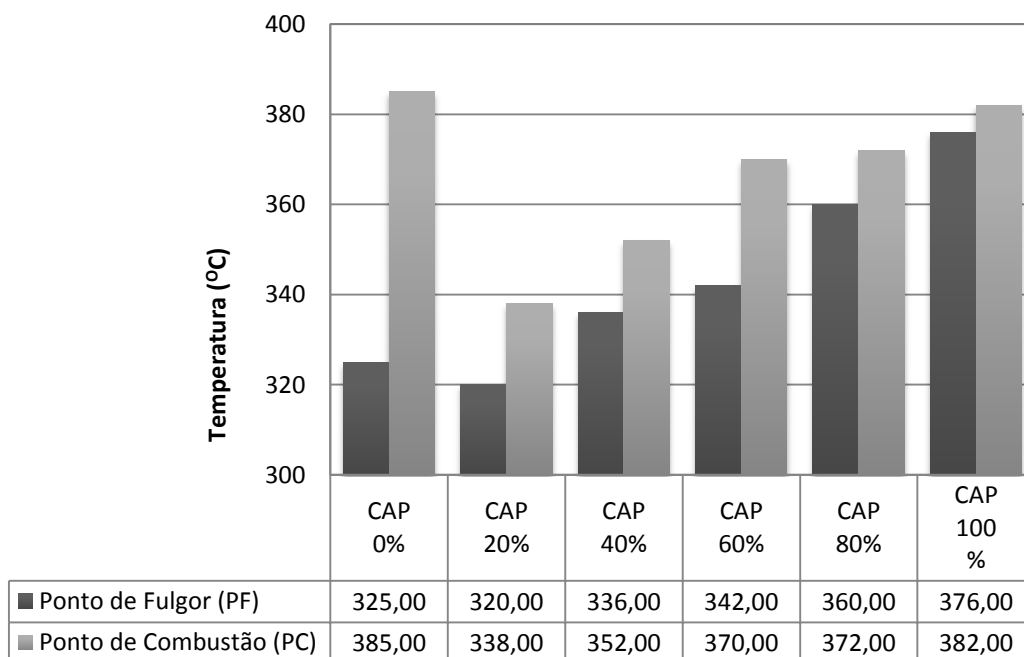


Figura 5.28 – Resultados dos ensaios de PF e PC para os teores estudados.

Analisando os valores do gráfico, percebe-se que os asfaltos modificados, a partir de 20% de adição apresentam maiores PF, quando comparados com CAP 0%. Ou seja, para que o material comece a inflamar, necessita estar sob a condição de maior temperatura, o que se torna um aspecto positivo, aumentando o grau de segurança do ligante quando da ocorrência de fogo. No entanto, constatou-se também que os PC dos ligantes modificados se apresentam em temperaturas mais baixa, em relação ao ligante de referência.

O potencial de inflamabilidade do ligante diminuiu à medida que o teor de gesso era acrescido. A exemplo, o CAP 100%, só apresenta risco de inflamar, a partir da temperatura igual a 376 °C, enquanto que para o CAP 40% isto ocorre à temperatura de 336°C.

Este comportamento pode ser influenciado pelas próprias características do gesso, que apresenta propriedades isolantes, possuindo coeficiente de condutividade térmica muito fraca, igual a 0,46W/m ·°C (INCROPERA, 2003), conferindo considerável resistência ao fogo.

5.3 RESULTADOS E ANÁLISES DA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS

5.3.1 Resistência à Tração e Módulo de Resiliência

A Figura 5.29 apresenta os resultados médios obtidos nos ensaios de RT, no qual pode-se inferir que as misturas contendo fíler gesso contribuíram com o incremento nos resultados da RT quando comparadas com CA-0, e quanto maior esse percentual, maiores resistências foram alcançadas. Isto ocorre devido, uma vez discutido no item 6.2.2, a influência do gesso no ligante que promove o aumento de sua viscosidade, e consequentemente, favorece o ganho na resistência à tração dos corpos de prova.

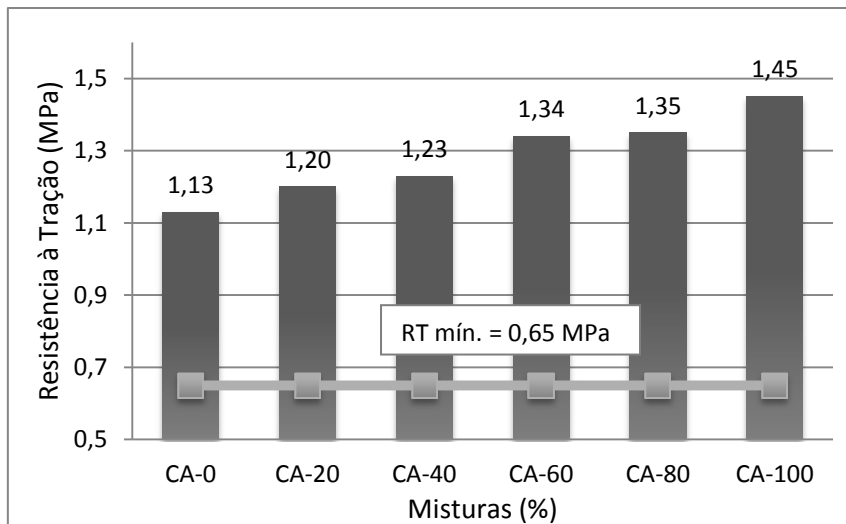


Figura 5.29 - Resultados dos ensaios de RT para as mituras.

Observa-se ainda que os resultados da RT variaram entre 1,13MPa a 1,45 MPa atendendo ao valor mínimo de 0,65 MPa, exigido pela norma de especificação de serviço para concreto asfáltico, DNIT- ES 031/2006.

O aumento da RT para as misturas contendo gesso é positivo, porém outros parâmetros devem ser avaliados conjuntamente, tais como, por exemplo, MR e VF, com o intuito de obter um melhor entendimento do desempenho do material. Neste sentido, as misturas também foram submetidas ao ensaio de MR, o qual foi importante para a avaliação da capacidade do material em absorver mais ou menos tensões.

De acordo com a Figura 5.30, nota-se que as misturas com maior rigidez (contendo maior percentual de gesso) obtiveram os maiores valores de módulo de resiliência.

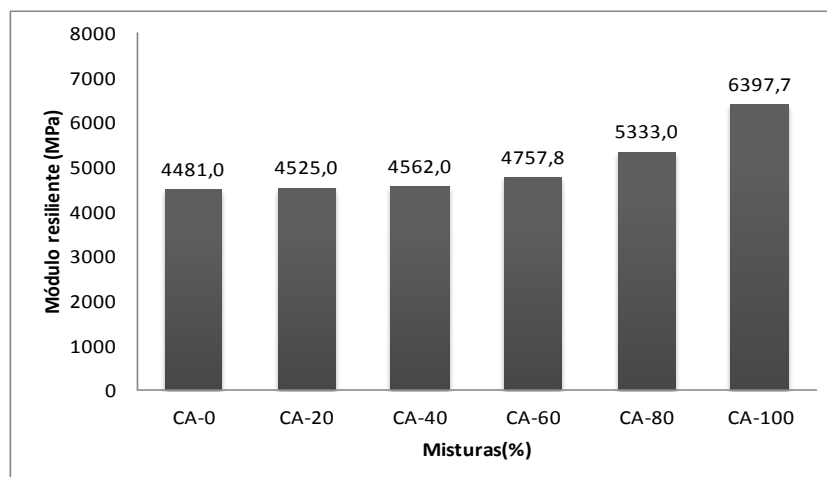


Figura 5.30 - Resultados dos ensaios de MR para as mituras.

Alguns autores apresentam a relação MR/RT como parâmetro de comparação entre as misturas no que diz respeito ao comportamento à fadiga. Leite *et al.* (2000) sugerem que misturas com relações MR/RT da ordem de 3000 MPa tendem a apresentar um bom comportamento estrutural, ou seja são flexíveis, enquanto ao mesmo tempo, possuem boa resistência à tração.

Logo, a relação MR/RT foi determinada para as misturas estudadas, conforme Figura 5.31, onde foi possível verificar que todos os CPs, com exceção de CA-100 apresentaram valores na ordem de 3000 MPa.

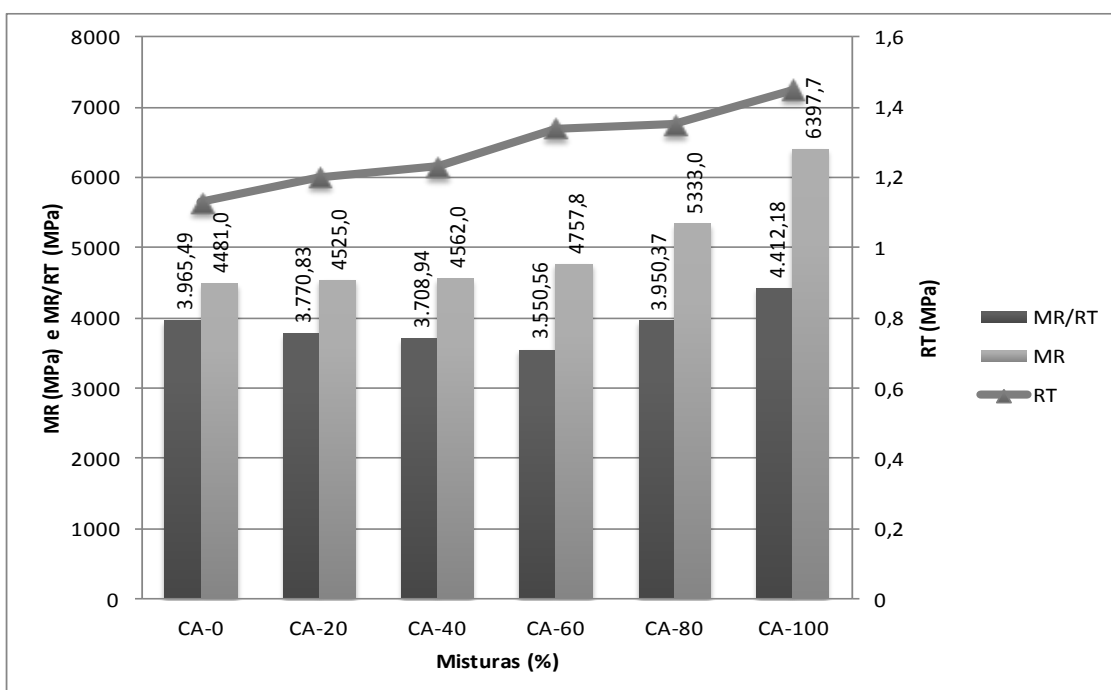


Figura 5.31 – Valores de RT, MR e MR/RT em função das misturas estudadas.

Os autores entendem também que, quando a razão MR/RT é menor, significa que a mistura apresenta baixa rigidez (o que evita absorver maiores tensões por parte do revestimento) e possui alta resistência à tração, ou à ruptura (geralmente uma maior resistência à ruptura é também associada a uma maior resistência à fadiga). Porém, tal constatação não deve ser avaliada de forma direta, devendo o pesquisador prever um conjunto de outras análises que tragam subsídios para inferir esta tendência.

5.3.2 Vida de Fadiga

Os resultados de VF, traduzidos pelas curvas (linearizadas na escala log-log) estão apresentados na Figura 5.32 e apontam que ocorreu uma melhora nesta propriedade de forma crescente para as composições, CA-60, CA-80 e CA-100. Ou seja, para um mesmo estado de tensão, tais misturas alcançaram maiores números de repetições (N). As demais composições, pouco diferiram dos resultados obtidos para a mistura de referência.

A Tabela 5.7 apresenta as constantes obtidas dos ensaios experimentais, indicados nas curvas de fadiga.

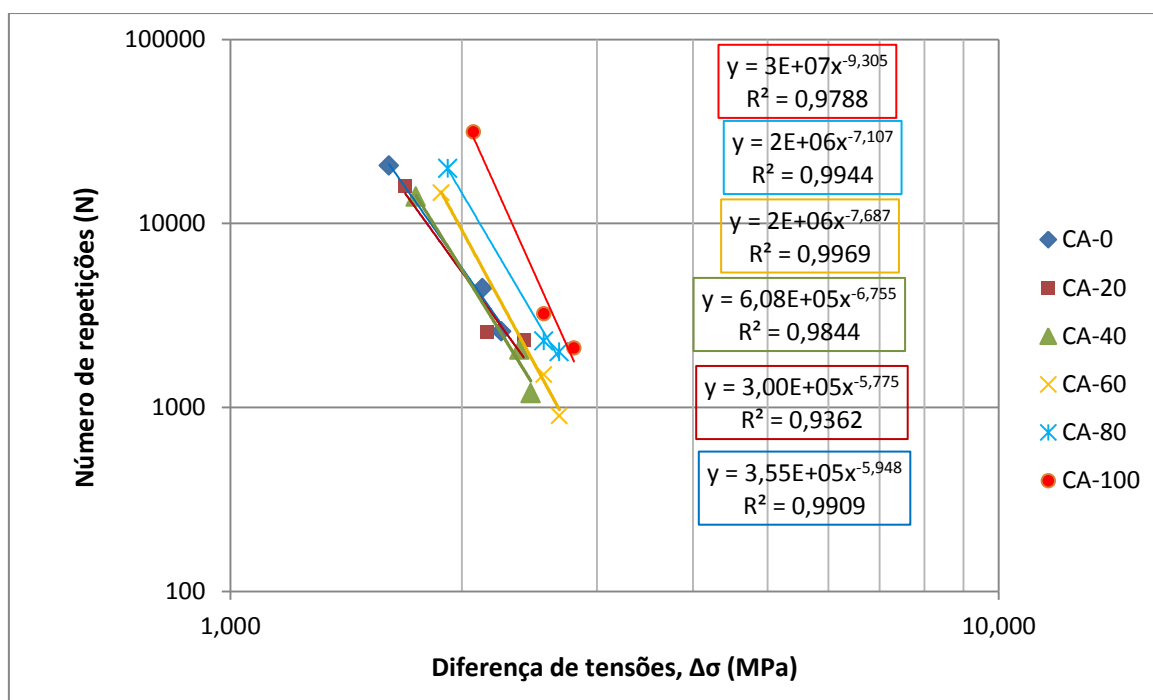


Figura 5.32 – Gráfico contendo os resultados dos ensaios de vida à fadiga em função das misturas.

Tabela 5.7 - Valores dos coeficientes K_1 , n_1 e do coeficiente de determinação R^2 .

	K_1	n_1	R^2
CA-0	3,55E+05	-5,94	0,99
CA-20	3,00E+05	-5,77	0,94
CA-40	6,08E+05	-6,75	0,98
CA-60	2E+0,6	-7,68	0,96
CA-80	2E+0,6	-7,10	0,99
CA-100	3E+0,7	-9,30	0,98

Freitas (2010), também ensaiou corpos de prova de CA e observou que as misturas contendo fíler gesso proporcionaram incremento à vida de fadiga. A mistura com 4% de fíler obteve a maior vida de fadiga, seguida da mistura 2% e esta, valor maior do que a mistura de referência.

Na presente pesquisa, mesma tendência foi constatada, destacando-se para a mistura CA-100 (o que equivale a 4,7% de fíler na mistura) o melhor resultado. No entanto, a mesma mistura não obteve a menor relação MR/RT, conforme sugerido por Leite *et al.* (2000).

O comportamento positivo das misturas estudadas condiz com os resultados apresentados nos ensaios de DSR, no qual foi visto que para os CAPs modificados ocorreu a combinação dos fatores; diminuição do ângulo de fase (δ) com aumento do módulo complexo G^* (em especial para CAP 60%, CAP 80% e CAP 100%). Esta característica tende a proporcionar um equilíbrio entre rigidez e elasticidade, conferindo assim, melhorias nas propriedades mecânicas do revestimento.

O ensaio de fadiga é de fundamental importância, pois simula a passagem de roda de um veículo no pavimento que contribui para o surgimento dos defeitos encontrados devido ao fenômeno de trincamento.

5.3.3 Deformação permanente (*Creep* estático)

Com a finalidade de verificar o comportamento quanto à deformação permanente das misturas asfálticas, foi realizado o ensaio de *creep* estático. Na Figura 5.33 estão representados os valores de deformação acumulada ao longo do tempo, assim como os valores de recuperação elástica obtidos pelas seis misturas avaliadas.

Observa-se então, que as misturas com adição de gesso; CA-60, CA-80 e CA-100 apresentaram melhor comportamento, em relação às demais, devido à menor retenção de deformações permanentes e melhor resposta às recuperações elásticas, conforme visto na Tabela 5.8.

A recuperação elástica dos CPs (após a fase de retirada do carregamento) é calculada dividindo-se o valor que o CP “encurtou” pelo deslocamento máximo relativo.

De acordo com Bernucci *et al.*, (2006) uma mistura asfáltica que ultrapassa um deslocamento relativo de 0,008 mm/mm ao final de 1 hora, não é adequada para resistir às deformações permanentes. Analisando a Tabela 5.8, nota-se que todas as misturas apresentaram valores menores do que o referido limite.

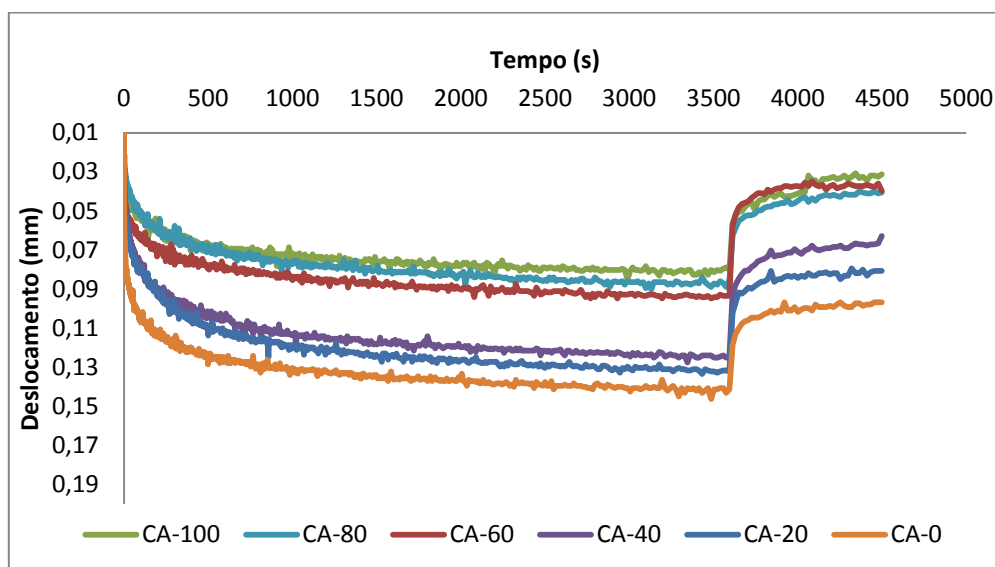


Figura 5.33 – Gráfico contendo as curvas do ensaio de creep estático para as misturas.

Tabela 5.8 – Valores médios para as deformações máximas e recuperação elástica relativa das misturas.

Misturas	Deslocamento max. relativa (a)	Deslocamento final relativo (b)	Altura CP (mm)	Valor do encurtamento (%) a-b (c)	Recuperação elástica relativa (%) (c/a)
CA-0	0,0023	0,0016	61,28	0,076	32,4
CA-20	0,0022	0,0013	60,35	0,085	38,9
CA-40	0,0021	0,0010	60,41	0,103	49,7
CA-60	0,0015	0,0006	61,12	0,090	58,1
CA-80	0,0014	0,0007	61,88	0,078	54,4
CA-100	0,0013	0,0005	60,37	0,081	60,9

A deformação permanente e a suscetibilidade à fadiga são defeitos que ocorrem com frequência. O combate a esses dois defeitos representa produzir misturas asfálticas com características mecânicas antagônicas.

Isso se deve ao fato de que para reduzir a suscetibilidade à fadiga, a mistura asfáltica deve apresentar alta flexibilidade, ou baixa rigidez, enquanto que para o combate à deformação permanente a mistura deve ser mais rígida, ou seja, na maioria das vezes quando se melhora de uma das características, piora-se a outra.

Neste caso, percebe-se um aspecto positivo: as misturas contendo 60%, 80% e 100% de gesso, demonstraram bons resultados tanto para o aumento da VF, quanto no combate à deformação permanente.

5.3.4 Dano por umidade induzida

O efeito da água em separar ou descolar a película de ligante asfáltico da superfície do agregado pode torna-lo inaceitável para uso em misturas asfálticas. Portanto, esta susceptibilidade à água por parte das misturas, deve ser avaliada.

Basicamente, dois métodos de ensaios são utilizados para avaliar as características de adesividade: o ensaio normalizado pela norma DNER 078/94, no qual, a mistura asfáltica não compactada é imersa em água e as partículas cobertas pelo ligante são avaliadas visualmente, e; os ensaios que avaliam o desempenho mecânico da mistura compactada, sob a ação da água. Para este, adotou-se o método de ensaio descrito na ASTM D 4867 (item 4.2.5).

Os resultados dos testes demonstraram que após o condicionamento dos CPs (em água à 60°C por um período de 24h), todas as misturas contendo gesso tornaram-se susceptíveis ao dano por umidade. Esta condição foi verificada por meio da Razão de Resistência à Tração (RRT), que relaciona as resistências à tração das misturas asfálticas condicionadas à umidade (RTu) e as misturas secas, não condicionadas (RT) (Figura 5.34). Segundo especificação AASHTO MP 8-01 o limite mínimo, aceitável da

RTT para misturas contínuas é de 70%. Ou seja, a perda deve ser inferior ou igual a 30%.

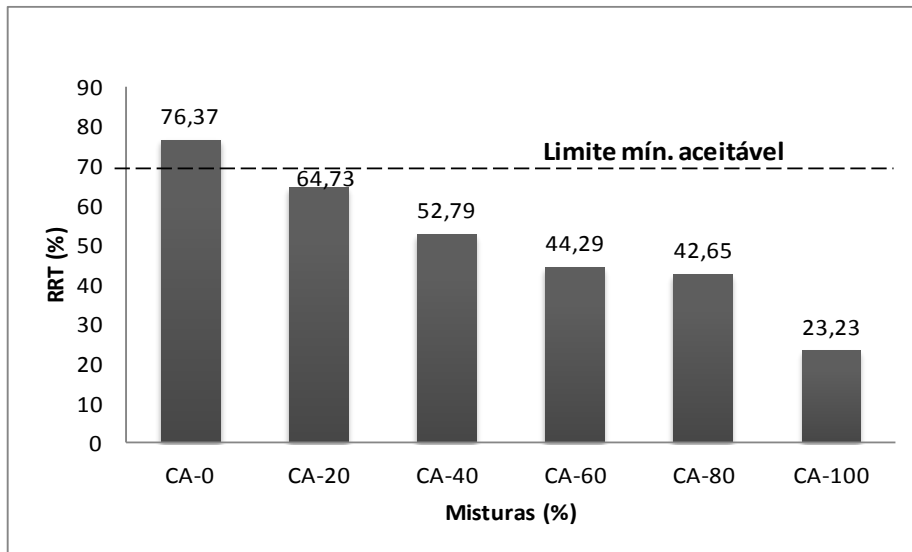


Figura 5.34 – Valores de RRT determinados para as misturas.

Para os CPs contendo maiores teores de gesso, os efeitos deletérios da umidade foram mais evidentes, comprovados pela perda de resistência (RT) após condicionamento, e consequentemente, o aumento da RRT. Para melhor visualização a Figura 5.35 destaca os resultados de RT e RTu, separadamente.

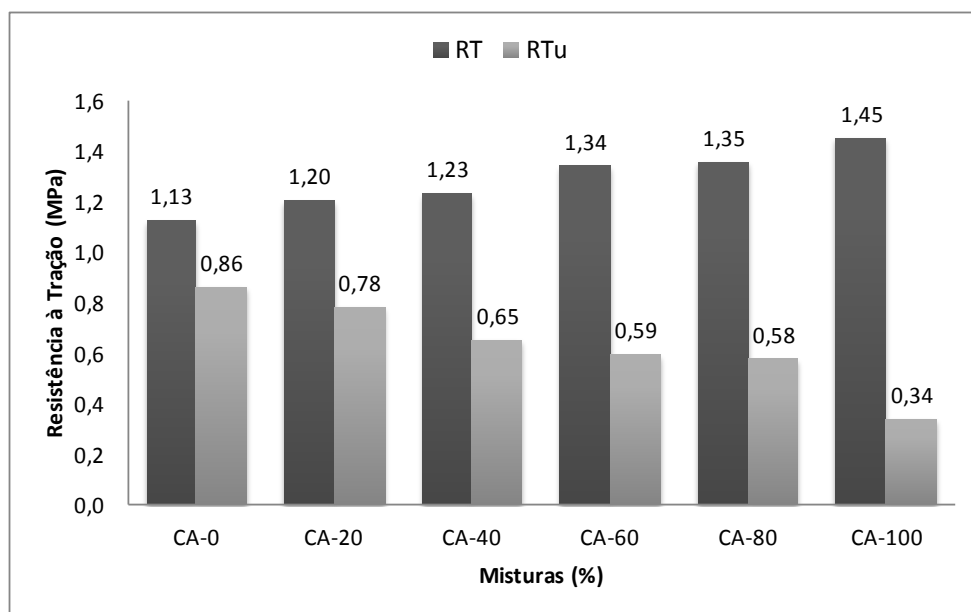


Figura 5.35 – Resultados das RT e RTu para as composições de CA.

Vale comentar que o baixo desempenho das misturas asfálticas com adição de gesso, quando na presença de água, já havia sido comprovado no ensaio de adesividade (item 3.2.1.7), onde a mistura não compactada contendo CAP modificado (60%, 80% e 100% de fíler gesso) apresentaram deslocamento da película do ligante. Isto pode estar associado também ao fenômeno de expansão que ocorre com o gesso, dada a condição de saturação, comprometendo assim a adesividade entre o agregado e o ligante modificado.

Estes resultados limitam o uso das misturas contendo fíler gesso, uma vez que, segundo Lutif *et al.* (2008) o desempenho dos revestimentos asfálticos está relacionada com a coesão e adesão no sistema CAP-agregado.

Para elucidar a ação da água nas misturas com maiores teores de gesso, a Figura 5.36 apresenta um exemplo de CP condicionado após ensaio de RT e outro não condicionado, onde é possível observar certa desagregação das partículas do CP condicionado.

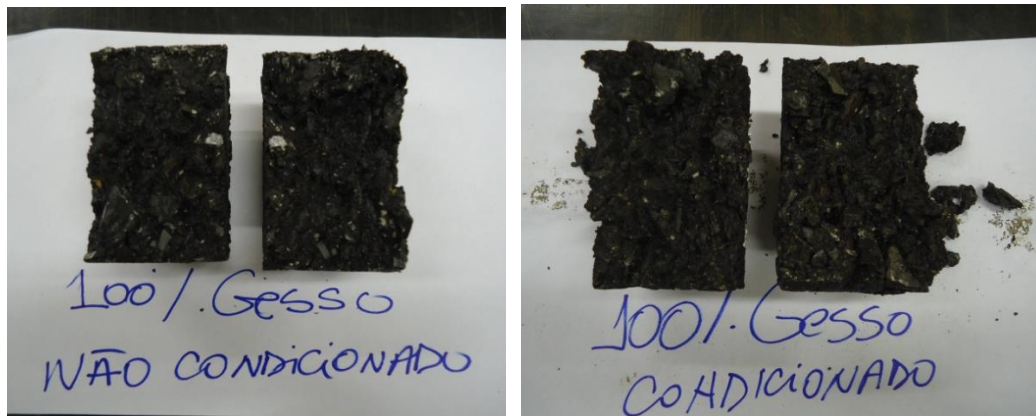


Figura 5.36 - Aspectos do corpo de prova CA-100 após o ensaio de dano por umidade.

5.3.5 Ensaio Cantabro

Com o objetivo de investigar o comportamento das misturas contendo gesso, frente à perda de massa por ação do atrito, foi realizado o ensaio Cantabro, conforme descrito no item 4.2.6.

Os valores obtidos estão apresentados na Figura 5.37, sendo possível perceber que as misturas contendo fíler gesso sofreram maior desgaste, quando comparadas com a mistura de referência.

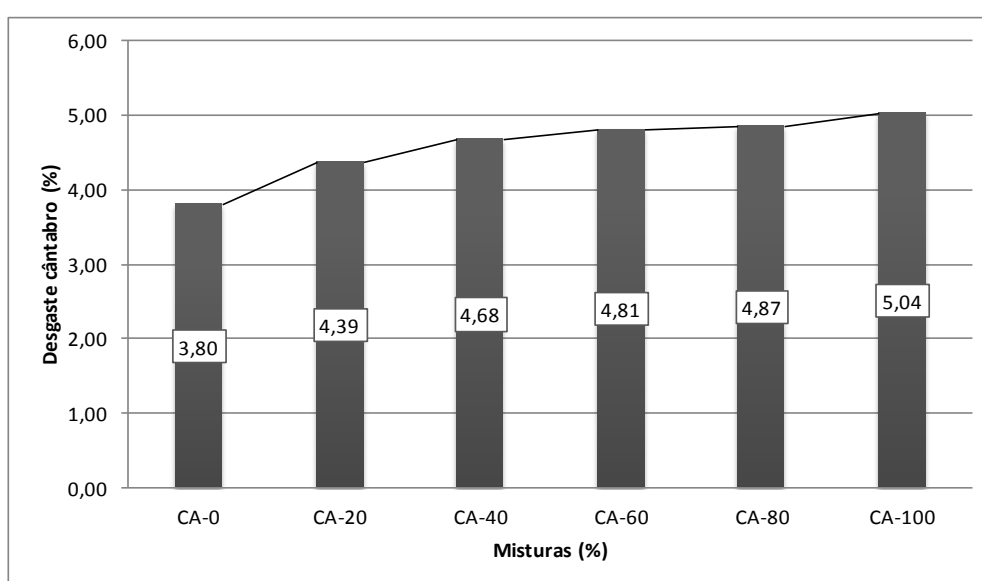


Figura 5.37 – Resultados do ensaio Cantabro para as misturas asfálticas.

Porém, considerou-se que tais acréscimos não foram tão expressivos, quando comparados com CA-0. A exemplo das misturas CA-100, que mesmo obtendo 100% de fíler gesso em substituição ao fíler calcário, obteve desgaste igual a 5%, aproximadamente. Buscando-se fazer relação com a norma de asfaltos polímeros destinados à camadas porosas de atrito (DNER ES 386/99), verificou-se que todos os CPs apresentaram desgaste menor que o limite máximo fixado em 25%.

Ao final do ensaio, foram realizados registros fotográficos das misturas, possibilitando a observação dos aspectos finais dos CPs, onde não foram constatadas grandes diferenças de aspectos entre as misturas contendo gesso e a mistura de referência (Figura 5.38).

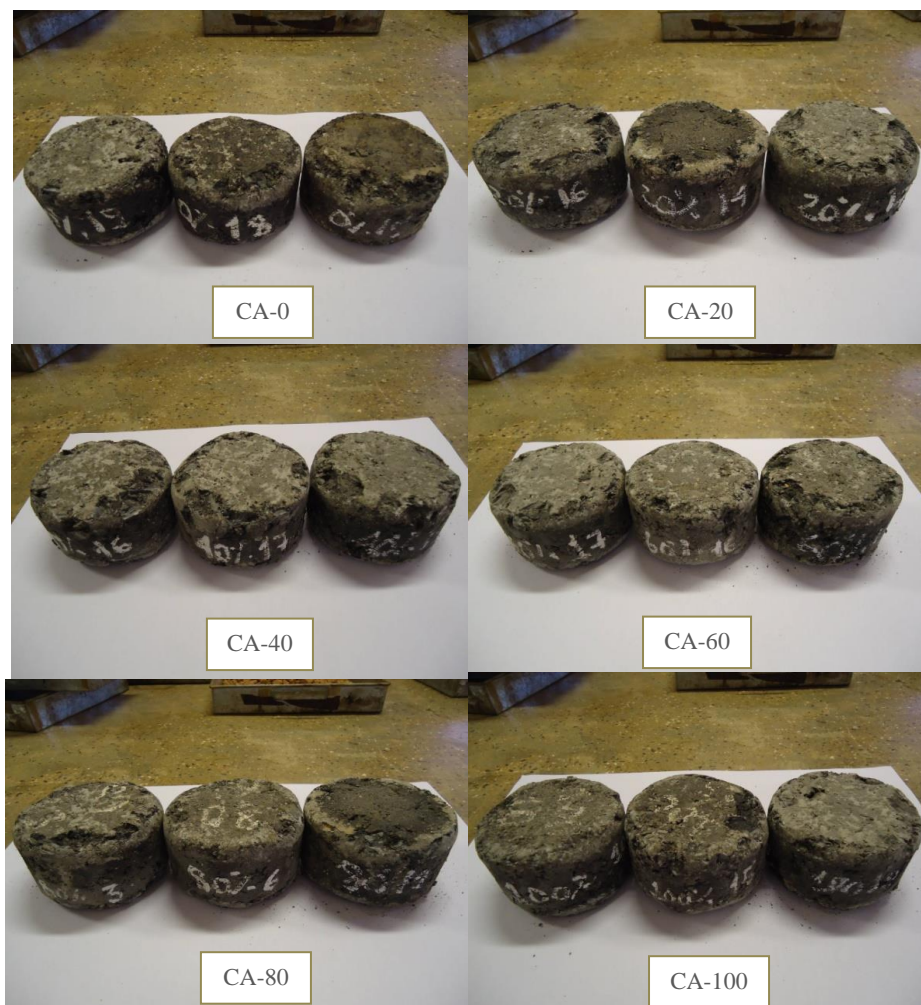


Figura 5.38 – Aspecto das misturas após o ensaio Cantabro.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1.1 Estudo dos agregados e do fíler gesso

Os agregados e o fíler gesso estudados nesta pesquisa, demonstraram-se adequados à utilização em revestimento asfáltico do tipo concreto asfáltico. A seguir, serão destacadas algumas considerações mais relevantes acerca dos ensaios de caracterização.

- A análise granulométrica do gesso revelou que o material apresenta 90% de grãos menores do que 20 μ m; o que é positivo, pois provavelmente o gesso irá atuar na mistura como fíler ativo, formando o “mástique”, aumentando a viscosidade e o ponto de amolecimento do CAP, além de diminuir os efeitos da suscetibilidade térmica do mesmo. Portanto, as características do fíler podem influenciar significativamente nas propriedades do mástique e, conseqüentemente, no desempenho da mistura asfáltica;
- As análises química e mineralógica do gesso identificaram a presença de metais pesados, tais como níquel (Ni) e estrôncio (Sr), porém em baixos percentuais. Em relação à sua mineralogia, a maior presença detectada foi a do mineral gipsita confirmando a predominância de gesso na composição das CGA;
- Constatou-se por meio do ensaio de ATG que o gesso sofre perda de massa a partir da temperatura de 100°C, tendo máximo percentual de perda (19%) na temperatura igual a 143°C;
- O gesso em estudo apresenta cargas superficiais do tipo eletronegativas, enquanto que os agregados são de origem calcária, e por isso, tornam-se positivamente carregados na presença de água. Estas características poderiam promover melhorias no aspecto da adesividade entre agregados-ligantes modificados, aqui estudados. Entretanto, não foi o que ocorreu para CAP 60%,

CAP 80% e CAP 100%, onde se observou descolamento da película de CAP, no ensaio de adesividade;

- O ensaio de expansão indicou uma variação de 0,4% em relação ao eixo vertical da amostra (h), demonstrando que o material apresenta comportamento expansivo, em situações de saturação. Este fenômeno pode ter influenciado nos resultados insatisfatórios obtidos nos ensaios relacionados à adesividade entre agregados-ligantes modificados e das misturas asfálticas;
- O ensaio de abrasão *Los Angeles* para os agregados (brita zero e brita 1) demonstrou que estes materiais são adequados na utilização de revestimentos asfálticos, uma vez que, após o processo de abrasão os valores encontrados para o ensaio foi de 13% e 18%, para a brita zero e brita 1, respectivamente, sendo que para concreto asfáltico é desejável um desgaste *Los Angeles* igual ou inferior a 40%, conforme DNER-ES 313/97;
- A adesividade do agregado aos ligantes asfálticos, determinada pelo método DNER- ME 078/94 foi considerada satisfatória para as adições até 40% . Contudo, também foi observado que a presença de água na mistura agregados-ligantes ocasionou o deslocamento da película para os teores de 60, 80 e 100% de gesso.

6.1.2 Estudo dos ligantes modificados

A seguir, serão comentados os principais resultados do estudo dos ligantes modificados, os quais indicaram que a adição do fíler gesso promoveu melhorias em várias propriedades dos CAPs.

- Os ensaios indicaram que o fíler gesso modificou as propriedades reológicas dos ligantes analisados, evidenciado pelo aumento na viscosidade dinâmica, redução da penetração e aumento do ponto de amolecimento das amostras à medida que se adicionou o fíler. Estes efeitos já eram esperados uma vez que os teores

modificados são mais consistentes, e por isso, diminuem a penetração e amolecem em temperaturas superiores quando comparados com o CAP natural;

- O aumento da viscosidade contribui com a melhoria dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas, uma vez que CAPs mais viscosos, menos penetráveis e com maiores pontos de amolecimento proporcionam o aumento da resistência às deformações sofridas por tais pavimentos. Observa-se ainda, que a presença de fibras de vidro no gesso ocasionou um incremento na propriedade de viscosidade, evidenciado nos gráficos de viscosidade *versus* temperatura;
- Por meio do ensaio de DSR foi possível verificar que os ligantes contendo 60%, 80% e 100% de gesso apresentaram um comportamento mais rígido, e ao mesmo tempo elástico do que os demais teores;
- Ligantes modificados com maiores percentuais de gesso, necessitam de temperaturas mais elevadas para as fases de mistura e compactação no momento da produção do CA, sendo que o CAP não deve ser utilizado a temperaturas maiores do que 177°C. Neste caso, as misturas com teores acima de 60% de gesso necessitaram de maior tempo para a mistura dos agregados e fíler, e foram produzidas com temperaturas em torno de 175°C;
- Após o ensaio de envelhecimento dos ligantes, foram observadas perdas de massa para todos os teores, o que normalmente acontece quando da presença de materiais voláteis no ligante. Entretanto, maiores valores de perda de massa foram vistos para os CAPs modificados, devido o processo de desidratação do gesso (diminuindo a sua massa) quando submetido à temperaturas acima de 100°C;
- Analisados os comportamentos de suscetibilidade térmica dos ligantes, verificou-se que as adições de gesso a partir de 60% tornaram os asfaltos menos suscetíveis à variações de temperatura, uma vez que, por serem ligantes com maior viscosidade, são menos sensíveis termicamente. Este resultado é positivo frente aos efeitos climáticos a que o pavimento estará sujeito;

- Com base nos ensaios de PF e PC, conclui-se que asfaltos modificados, a partir de 20% de adição iniciam o processo de inflamabilidade em maiores temperaturas, conseqüentemente aumentando o grau de segurança do ligante na ocorrência de chamas. No entanto, o PC dos ligantes modificados ocorreram em temperaturas mais baixa, em relação ao ligante de referência.

6.1.3 Estudo do comportamento mecânico das misturas asfálticas

A partir dos resultados dos ensaios de RT, MR, VF, *creep*, dano por umidade induzida e ensaio Cantabro, foi possível observar os efeitos do fíler gesso (em substituição ao fíler calcário) no desempenho mecânico dos CA. Desta forma, serão comentadas as principais conclusões deste estudo.

- Em relação à mistura de referência, para todas as composições ocorreu o aumento considerável da RT, proporcionado pelo emprego do fíler gesso, que uma vez misturado aos demais materiais, tornou o mástique mais rígido e conseqüentemente colaborou com os acréscimos de resistência do material;
- Os resultados de MR também acompanharam este comportamento, pois quanto mais rígido o material, maior é a capacidade de absorver tensões de tração e conseqüentemente obtém-se misturas com valores de módulos resilientes mais altos. Neste caso, CA-80 e CA-100 tiveram acréscimos expressivos em relação à composição CA-0;
- Observou-se uma melhora nos resultados obtidos para VF, percebida com maior ênfase, em ordem decrescente para as misturas CA-100, CA-80, e CA-60. Como visto no ensaio de DSR, o equilíbrio entre rigidez e elasticidade deve contribuir com a otimização do comportamento observado por meio das curvas de fadiga;

- Além do aumento à VF, o gesso também acarretou benefícios no combate à deformações permanentes, observadas no ensaio de *creep* estático, onde misturas com contendo gesso apresentaram menor acúmulo de deformação permanente, de forma gradativa em comparação com a mistura CA-0. Estes resultados também podem proporcionar uma maior vida útil do pavimento;
- Os resultados dos testes de RT após o condicionamento dos CPs (em água à 60°C por um período de 24h), indicaram que todas as misturas contendo gesso tornaram-se susceptíveis ao dano por umidade, não atendendo a limites mínimos normalizados. Esta condição foi verificada por meio da Razão de Resistência à Tração (RRT), que relaciona RT e RTu;
- As misturas também foram avaliadas quanto ao comportamento frente ao desgaste por atrito, simulado pelo ensaio Cantabro. Após o ensaio, as amostras sofreram pequena perda de massa, demonstrando que a adição do gesso, mesmo no caso de 100% de substituição, não comprometeu de forma significativa o nível de desgaste das misturas por atrito.

A adição de fíler gesso nas misturas asfálticas promoveu melhorias nas principais características mecânicas requeridas para o pavimento. Todas as misturas compostas por fíler gesso, em substituição ao fíler calcário demonstraram desempenho superior em relação ao CA de referência. Os melhores resultados obtidos foram para aquelas misturas contendo maiores percentuais de gesso (60%, 80% e 100%).

Por outro lado, o uso do fíler alternativo, quando submetido à condição de umidade, fica comprometido. Resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa demonstraram perda de resistência à tração, de misturas asfálticas contendo fíler gesso e perda de adesividade entre ligantes modificados e agregados. Esses efeitos foram mais visíveis em CAPs modificados com 60%, 80% e 100% de gesso e nas misturas asfálticas com 40%, 60%, 80% e 100% de substituição.

Conclui-se desta forma, que o fíler gesso pode ser utilizado em CA, porém, em percentuais limitados a 20% do material, tendo em vista que nesta faixa não ocorrerá o comprometimento da vida útil do pavimento, quando sujeito à ação da umidade.

Outra alternativa, seria a utilização de CA com gesso como camadas de ligação, conhecida como “*binder*”. Assim, o material sofreria pouca influência da umidade, uma vez que ficaria “protegido”, não estando em contato direto com a superfície. Entretanto, esta alternativa é apenas um comentário, tendo que ser analisada com base em ensaios normalizados.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da presente tese, sugere-se que novas pesquisas sejam desenvolvidas, a fim de complementar os estudos sobre o material gesso (oriundo das CGA), por meio de realização de ensaios adicionais de caracterização e determinação de propriedades físico-mecânicas, tanto para os ligantes asfálticos, quanto para as misturas.

Desta forma, sugere-se como temas para trabalhos futuros, os seguintes pontos:

- Estudos dos ligantes e misturas asfálticas contendo fíler gesso experimentando outra faixa de percentual de adição. Sugere-se teores variando entre 0 e 20% de substituição aos fíleres usuais;
- Estudos da utilização do fíler gesso como material de enchimento em camadas de ligação (*binder*);
- Avaliação química dos ligantes modificados com gesso possibilitando o entendimento da interação dos dois materiais e os seus efeitos sobre as propriedades dos ligantes;
- Realização de ensaios de caracterização das fibras presentes no gesso, para subsidiar as análises dos efeitos destas nos ligantes e misturas asfálticas;

- Estudos de misturas asfálticas com adição de gesso, utilizando o método de dosagem SUPERPAVE;
- Estudo de métodos mais eficientes de transformação dos gessos originados das CGA em material de enchimento; fíler.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP nº 19, de 11 jul. 2005**. Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP). Brasília: Diário Oficial da União, publicada em 12 jul. 2005, republicada em 13 jul. 2005, retificada em 25 jul. 2005 e 17 mar. 2006.

ALENCAR, A.E.V. **Estudo das propriedades do cimento asfáltico de petróleo modificado por copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA)**. 2005. 88f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Ceará (UFC), 2005.

AL-QUADI, I. L.; SAYED, T.; ALNUAIME, N. A.; MASAD, E. **Efficient transportation and pavement systems: Characterization, mechanisms, simulation and modeling**. London: Taylor & Francis Group, 2009.

AMARAL, S. C. **Estudo de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)**. 2000.147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), 2004.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **AASHTO MP 8-01** – Standard specification for designing Stone Matrix Asphalt (SMA). Washington, 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **AASHTO T 85** – Standard Method of Test for specific gravity and absorption of coarse aggregate. Washington, 1991.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **AASHTO T 209** – Standard Method of Test for Maximum Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures. Washington, 1999.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **AASHTO T 283/89** – Resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage. Washington, 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-4 Proposal P246-95**. Determining the rheological properties of asphalt binder for specification purposes using a dynamic shear rheometer. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, Philadelphia, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 127-04** – Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregates. Philadelphia, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1075-96** – Standard test method for effects of water on compressive strength of compacted bituminous mixtures. Philadelphia, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2041-00** – Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures. Philadelphia, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2872-97** - Effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test). Philadelphia, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4123 – 82**. Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures. Philadelphia, 1982.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4402-02** – Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. Philadelphia, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6373-07e1**- Standard specification for performance graded asphalt binder. Philadelphia, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS . **ASTM D 4867-96** – Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures. Philadelphia, 1996.

ASPHALT INSTITUTE. The asphalt handbook. Manual series n.4 (MS-4), 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11341**: Materiais betuminosos - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, 2008. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos. Áreas de transbordo e triagem – diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15140**: **Misturas asfálticas – Determinação do desgaste por abrasão Cantabro**. Rio de Janeiro, 2004. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6293**: Materiais betuminosos - Determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 2001. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6296**: Produtos betuminosos semi-sólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, 2001. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6560**: Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2008. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6954**: Lastro padrão – Determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1989. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12891**: Dosagem de misturas betuminosas pelo método *Marshall* – Procedimento. Rio de Janeiro, 1993. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15235**: Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro, 2009. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE CHAPAS PARA DRYWALL (ASSOCIAÇÃO DRYWALL). Disponível em: <<http://www.drywall.org.br/>>. Acesso em: 05 mar. 2011.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica – materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARRA, B. S.; MOMM, L.; BERNUCCI, L. L. B. **Influência do pó calcário calcítico do estado do Pará na dosagem dos mástiques e na viscosidade dos cimentos asfálticos de petróleo**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36., 2005, Curitiba. Anais... Curitiba: ABPv, 2005.

BENEVIDES, S. A. S., 2000, **Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos Asfálticos: Empírico do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em rodovias do Estado do Ceará**. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS & ABEDA, 2006.504p.

BONET, I. I. **Valorização do resíduo de areia de fundição (RAF). Incorporação nas massas asfálticas do tipo CBUQ**. 2002. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2002.

CHOQUET, F. (1993). **International Conference on Strategic Highway (SHRP) and Traffic Safety on Two Continents**, The Hague, The Netherlands, 22-24, September 1993.

COELHO, V. **Consideração sobre o Método *Marshall***. In: 26ª Reunião Anual de Pavimentação, 1992, Aracaju: 26ª RAPv, 1992.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº. 307 de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 12 jul. 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n°. 431 de 2002. Altera o art. 3º da Resolução n° 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=649>>. Acesso em: 12 jul. 2011.

DE LUCCA, R. **Com Gesso: uma casa em 20 dias**. Construção, São Paulo, n.1366, p. 14-16, abr. 1974.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006 - ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006, 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/98: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER EM-037/97: Agregado graúdo para concreto de cimento**. Rio de Janeiro, 1997, 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER EM-038/97: Agregado miúdo para concreto de cimento**. Rio de Janeiro, 1997, 5p.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 078/94: Agregado graúdo – adesividade ao ligante betuminoso**. Rio de Janeiro, 1994.

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

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 086/94: Agregado – determinação do índice de forma**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 089/94: Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 095/2006 - EM: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material.** Rio de Janeiro, 2006, 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNIT 117/1994 – ME:** Misturas betuminosas – determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro, 1994, 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 133/94:** Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 194/98:** determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-PRO199/96:** Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 313/97:** Pavimentação – concreto betuminoso. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER EM-367/97: Material de enchimento para misturas betuminosas.** Rio de Janeiro, 1997, 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ES - 386/99: Pavimentação: pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito.** Rio de Janeiro, 1999, 15p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNER - INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA – IPR. **Pesquisa de asfaltos modificados por polímeros – Relatório Final.** Tomo I e II. Rio de Janeiro, 1998.

Environment Agency. Apresenta informações sobre melhoria do meio ambiente e desenvolvimento sustentável. Reino Unido. Disponível em:< <http://www.environment-agency.gov.uk>.> Acesso em: 18 ago.2011.

Environment Agency. **Guidance on the management of landfill gas.** Bristol, UK, 2004. 123p.

EUROPEAN COMMUNITY. **2003/33/EC:** Council Decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC.

EUROPEAN STANDARDS. EN 12591: bitumen and bituminous binders: specification for pavement grade bitumen. 2000.

FREITAS, R.D. **Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado à quente.** 2010.161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE (UFCG), 2010.

GOUVEIA, F. P.; BEZERRA, L. M.; FARIAS, M. M. (2013). **Recycled Plasterboard Used as Asphalt Modifier.** Waste Management & Research. (artigo submetido).

HENRIK L. N. Experience in gypsum recycling on three continents. **Global gypsum magazine.** Denmark, p 26-33, may, 2007.

INCROPERA, F.P., Dewitt, D.P., **Fundamentos de transferência de calor e massa.** Guanabara Koogan, 4ª edição, Rido de Janeiro, 2003.

INSTITUTO DE ASFALTO, 2001, Tradução do Manual de Asfalto. Série do Manual n° 04 (MS-4), Edição 1989, Instituto de Asfalto.

INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIA – IPR. **Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros.** Relatório Final, Tomo II, p. 245, Rio de Janeiro, Brasil. 1998.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Alternativas de Gestão dos Resíduos de Gesso. Contribuição apresentada à discussão da reformulação da Resolução CONAMA 307, relativa à gestão do gesso.** 2003a. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Alternativas%20para%20gestão%20de%20resíduos%20de%20gesso%20v2.pdf>> Acesso em: 06 jan. 2010.

JOHN, V. M. **Gestão de Resíduos de Gesso.** Palestra apresentada no Sim. Latino Americano de Gesso (SLAG) Recife, 29 de agosto de 2003b. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm>>. Acesso em: 08/10/2011.

Knauf Drywall. Fabricante de chapas de gesso acartonado. Disponível em: <http://www.knaufdrywall.co.uk>. Acesso em 21 fev.2011.

KÜTÜK-SERT, T.; KÜTÜK, S. (2013). **Physical and marshall properties of borogypsum used as filler aggregate in asphalt concrete.** Journal of materials in civil engineering. Vol. 25, p 266-273.

LEITE. L. F. M. **Estudos reológicos dos cimentos asfálticos.** 1990.122f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 1990.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. 1999. 266f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) - Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa da Universidade Federal do Rio de Janeiro - (IMA/UFRJ), Rio de Janeiro, 1999.

LEITE, L.F.M., MOTTA, L.M.G., BERNUCCI, L.B., SOARES, J. B. (2000). Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory, In: Asphalt Rubber – The Pavement Material of the 21st Century – Proceedings. Vilamora, Portugal, p 309-318.

LEITE, L. F. M.; MOTTA, L. M. G. **Efeito do fíler nas características do ligante asfáltico**. Anais do XVI Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Associação Nacional de Pesquisa em Transportes (ANPET), Rio de Janeiro. 2002.

LEITE, L.F.M. **Notas de aula do Curso de Pavimentação Urbana**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2003.

LIMA, C. S. **Caracterização de ligantes asfálticos modificados com borracha de pneu e aditivo**. 2008.159f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia de Transporte) – Universidade Federal do Ceará (UFC), 2008.

LU, X., ISACSSON, U. (1998). **Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens**. Elsevier Science Ltd, Fuel Vol. 77, p 961 –972.

LUCENA, M. C. C. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros**. 2005. Tese de Doutorado - Pós-graduação em Química inorgânica, UFC, Fortaleza, CE. 2005.

LUTIF, J. E. S; KIM, Y. R; SOARES, B.S. **Influência do método de adição de cal hidratada em misturas asfálticas para reduzir os danos devido à umidade em pavimentos flexíveis**. Anais do XXII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte (ANPET), Fortaleza- CE, 2008.

MARCONDES, F. C. S.; CARDOSO, F.F. **Gerenciamento de resíduos de construção e demolição: a experiência de construtoras paulistas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 1., 2005, Porto Alegre. Anais...Porto Alegre: ANTAC, 2005. CD ROM.

MARCONDES. F.C.S. **Sistemas logísticos reversos na indústria da construção civil – Estudo da cadeia produtiva de chapas de gesso acartonado**. 2007.364f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Construção Civil e Urbana). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 2007.

MARVIN, E. **Gypsum wallboard recycling and reuse opportunities in the state of Vermont**. Vermont: Vermont Agency of Natural Resources, 2000.

MEDINA, J; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª Ed. Rio de Janeiro, RJ.

MELLO, L. G. R. **O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas asfálticas**. 2008. 263f. Tese de doutorado - Programa de Pós-graduação em Geotecnia. Universidade de Brasília (UnB), Brasília – DF, 2008.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. 2004. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2004.

MOURÃO, A. L. **Misturas asfálticas de Alto desempenho tipo SMA**. 2003. 131f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, 2003.

NAVARRO, F. J.; PARTAL, P.; GARCÍA-MORALES, M. MARTÍNEZ-BOZA, F.; GALLEGOS, C. (2007) **Bitumen modification with a low-molecular-weight reactive isocyanate-terminated**. *Fuel*, v. 86, p. 2291 – 2299.

New West Gypsum Recycling. Empresa de reciclagem de resíduo de gesso. Disponível em: <<http://www.nwgysum.com>>. Acesso em: 20 fev.2011.

ODA, S.;NASCIMENTO, L. A. H.;EDEL, G. **Aplicação de asfalto-borracha na Bahia**. In: Salvador, Bahia, Brasil: 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Anais...Salvador:IBP, 2005.

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

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. 1991. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 1991.

RAIJ, B. VAN, & PEECH, M. (1972). **Electrochemical properties of some oxisols and alfisols of the Tropics**. *Soil Science Soc. Am. Proc.* 36 (4):587-593.

RAMOS C.R.; GUARÇONI, D.;GUERREIRO, F. Curso de ligantes asfálticos. Rio de Janeiro: IBP, 1995.

ROAD RESEARCH LABORATORY – RRL. Bituminous materials in road construction. Department of scientific and industrial research, London, 1962.

ROSENO, J. L. **Avaliação de uma mistura asfáltica porosa com agregados calcários e asfalto-borracha**. 2005.149f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília (UnB), Brasília – DF, 2005.

SHELL. **The Shell bitumen handbook**. 5. ed. Cambridge, 2003.

SILVA, J.P.S. **Avaliação dos efeitos dos produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. 2011.145f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília (UnB), Brasília – DF, 2011.

SOARES, J. B.; FREITAS, A.C.; CASTELO BRANCO, J.V.; MOTTA, L.M.G. **Método de previsão do teor ótimo de ligante em misturas asfálticas tipo CBUQ**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 32., Brasília. Anais...Brasília, ABPv, 2000, v.I, p. 148-160.

SOUZA, M. V. R. **Efeito de fibras sintéticas nas propriedades de Ligantes e concretos asfálticos**. 2010.150f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília (UnB), Brasília – DF, 2010.

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004.279f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2004.

TONIAL, I. A., 2001. **Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2001.

TOWNSEND T. G.; BARNES, A.H.; COCHRAN, K.M.; CARLSON, J.J. **Recycling of discarded gypsum drywall in florida**.2001.238f. (Final report to the Florida department of environmental protection) - Department of environmental - engineering sciences - University of Florida, 2001.

TOWNSEND, T.; CHADIK, P.; BITTON, G.; BOOTH, M.; LEE, S. AND YANG, K. **“Gypsum drywall impact on odor production at landfills: Science and Control Strategies.”** Report submitted to the Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management. Gainesville, FL,USA.2000.

UGARTE, J.F.O.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. **Vermiculita – Capítulo 2. Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. CETEM (Centro de Tecnologia Mineral). Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, 2005. p. 677-698.

UK, 2011. Environment- Agency. Disponível em: < <http://www.environment-agency.gov.uk/>>. Acesso em: 20 de junho de 2011.

VEN, M. V; JENKINS, K. (2003). **Rheological characterization of some (Polymer modified) bitumen and bitumen–filler system at compaction and in-service temperatures**. 6th RILEM Symposium PTEBM'03, Zurich.