

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO
DE MATERIAIS ASFÁLTICOS CONSIDERANDO O
EFEITO DA TEMPERATURA**

Renato Peixoto Coutinho

Fortaleza, novembro de 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO
DE MATERIAIS ASFÁLTICOS CONSIDERANDO O
EFEITO DA TEMPERATURA**

Renato Peixoto Coutinho

Monografia relativa ao Trabalho de Final de
Curso, necessária para conclusão do Curso
de Engenharia Química da
Universidade Federal do Ceará.

Professora Orientadora:
Áurea Silva de Holanda, D.Sc

Professora da Disciplina:
Diana Cristina Silva de Azevedo, D.Sc

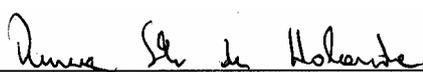
Fortaleza, novembro de 2009

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DE MATERIAIS ASFÁLTICOS CONSIDERANDO O EFEITO DA TEMPERATURA

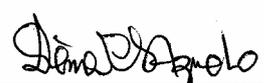
Renato Peixoto Coutinho

MONOGRAFIA SUBMETIDA À COORDENAÇÃO DO CURSO DE
ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO QUÍMICO

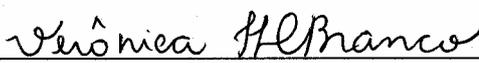
Aprovada por:



Prof. Áurea Silva de Holanda, D.Sc
(Orientador)



Prof. Diana Cristina Silva de Azevedo, D.Sc
(Examinador)



Prof. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D
(Convidado)

Fortaleza, CE – Brasil
Novembro de 2009

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Claudio e
Rosana pelo apoio
incondicional em meus estudos
e sonhos.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por acreditarem em mim e sempre me apoiarem em tudo que faço.

A minha namorada Érika, por acreditar em mim e sempre me fortalecer em todos os momentos.

A minha irmã Gabriela, meu cunhado Daniel e minha sobrinha Letícia, sem eles tudo seria bem mais difícil.

A professora Áurea, minha orientadora, por ter sido sempre atenciosa e dedicada.

A professora Verônica, pelo importante apoio na realização deste trabalho.

Aos meus amigos de infância Victor Mosca, Livia Mosca, Marcelo Gino e Evandro Neto por todos os momentos de diversão e companheirismo.

Aos professores Jorge Soares e Evandro Parente por terem disponibilizado tempo, sempre que necessário.

Ao laboratorista Rômulo, pela ajuda em todos os momentos da pesquisa.

Aos amigos Lorrán, Thais P, Reuber e Manuela pelas vezes que me ajudaram no laboratório.

A Annie e todos que fazem parte da FAMÍLIA LMP, por todo apoio e disponibilidade que sempre me ofereceram.

Aos meus amigos da Engenharia Química Sofia, Anax, Thais S, Diego, Carol, Lucas, Milene e Amanda pelos momentos de estudo e descontração nesses cinco anos de luta.

A ANP – Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Pavimentos flexíveis são por definição sistemas multicamadas com uma camada superficial de mistura asfáltica. A presença do ligante asfáltico na mistura faz com que o comportamento mecânico dependa do tempo, da taxa de carregamento e da temperatura. Verifica-se que este comportamento pode ser representado de maneira adequada através do uso de modelos constitutivos viscoelásticos. Assim, a consideração do comportamento viscoelástico das misturas asfálticas leva a respostas mais próximas da realidade se comparada as respostas encontradas com o uso de modelos elásticos usualmente adotados na análise de pavimentos. A temperatura é outro fator que influencia consideravelmente o comportamento das misturas asfálticas, sendo que para baixas temperaturas, com a redução da parte viscosa e diminuição do ângulo de fase, a rigidez tende a aumentar. Por outro lado, o aumento da temperatura gera uma redução na rigidez da mistura. Apesar disto, a influência da temperatura no comportamento de pavimentos asfálticos no Brasil é um tema ainda pouco estudado. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo da influência da temperatura no comportamento viscoelástico de materiais asfálticos em três escalas: (i) ligante, (ii) Matriz de Agregado Fino (MAF) e (iii) mistura asfáltica. É esperada a comprovação de que o comportamento destes materiais pode ser aproximados como termo-reologicamente simples, uma vez que esta hipótese é comumente adotada na literatura.

ABSTRACT

Flexible pavements are multi-layer systems with a surface layer of asphalt mixture. The presence of asphalt binder in the mixture causes the mechanical behavior to depend on the time and the rate of loading, as well as on the temperature. This behavior can be represented adequately through the use of viscoelastic constitutive models. Thus, consideration of the viscoelastic behavior of asphalt mixtures leads to responses closer to reality than the use of elastic models usually adopted for pavements analysis. Temperature is another factor that influences the behavior of asphalt mixtures, at low temperature, with the reduction of the viscous term and the decrease of phase angle, the stiffness tends to increase. On the other hand, the increase in temperature causes a reduction in stiffness of the mixture. Despite this, there are in Brazil few studies related to the influence of temperature on the behavior of pavements. Thus, this work aims to conduct a study of the influence of temperature on the viscoelasticity of bituminous materials using three scales: (i) binder, (ii) Fine Aggregate Matrix (FAM) and (iii) asphalt mixture. It is expected to observe that the asphalt mixture can be approximated as a thermorheologically simple material.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 – IMPORTÂNCIA DO TEMA..... | 1 |
| 1.2 – PROBLEMA DE PESQUISA..... | 2 |
| 1.3 – OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 3 |
| | |
| CAPÍTULO 2 | 5 |
| REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1 – CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)..... | 5 |
| 2.1.1 – Teste de Penetração..... | 6 |
| 2.1.2 – Ligante Modificado..... | 7 |
| 2.2 – AGREGADOS..... | 7 |
| 2.3 – MISTURA ASFÁLTICA..... | 9 |
| 2.3.1 – Matriz de Agregados Finos (MAF)..... | 10 |
| 2.4 – VISCOELASTICIDADE..... | 11 |
| 2.5 – EFEITO DA TEMPERATURA..... | 13 |
| 2.5.1 – Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT)..... | 13 |
| 2.6 – CURVA MESTRA..... | 16 |
| 2.6.1 – Construção de Curva Mestra..... | 16 |
| | |
| CAPÍTULO 3 | 20 |
| MATERIAIS E MÉTODOS..... | 20 |
| 3.1 – MATERIAIS EMPREGADOS..... | 20 |
| 3.1.1 – Dosagem das Misturas..... | 22 |
| 3.1.2 – Dosagem das MAF's..... | 23 |
| 3.2 – ENSAIOS MECÂNICOS..... | 25 |
| 3.2.1 – Ensaio de Módulo Dinâmico..... | 25 |
| 3.2.2 – Reologia em Ensaio Dinâmico-Mecânicos..... | 27 |
| | |
| CAPÍTULO 4 | 30 |
| RESULTADOS E ANÁLISES..... | 30 |
| 4.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DINÂMICO..... | 30 |
| 4.2 – ENSAIOS DE VARREDURA DE FREQUÊNCIA..... | 35 |
| 4.2.1 – Resultados e Análises para o CAP..... | 35 |
| 4.2.2 – Resultados e Análises para a MAF..... | 37 |
| 4.3 – ANÁLISE DOS MATERIAIS ASFÁLTICOS COM UTILIZAÇÃO DE LIGANTE CONVENCIONAL VERSUS LIGANTE MODIFICADO..... | 41 |
| | |
| CAPÍTULO 5 | 44 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 44 |
| 5.1 – CONCLUSÕES | 44 |
| 5.2 – SUGESTÕES..... | 45 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 46 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1. Teste de penetração. | 6 |
| Figura 2.2. Estrutura da mistura completa e da MAF. | 11 |
| Figura 2.3. Fator de deslocamento (a_t) tempo-temperatura. | 14 |
| Figura 2.4. Dados obtidos para módulo dinâmico para diferentes frequências e temperaturas. | 17 |
| Figura 2.5. Aplicação do fator de deslocamento (a_t). | 18 |
| Figura 2.6. Dados deslocados para a curva da temperatura de referência. | 18 |
| Figura 2.7. Curva mestra para a temperatura de referência de 5°C. | 19 |
| Figura 3.1. Misturador Silverson L4R®. | 20 |
| Figura 3.2. Distribuição granulométrica dos agregados com limites máximo e mínimo estabelecidos pelo DNIT para a faixa “C”, mistura do tipo CA. | 22 |
| Figura 3.3. Distribuição granulométrica dos agregados na MAF. | 24 |
| Figura 3.4. CP de MAF extraído a partir de um CP do CGS. | 24 |
| Figura 3.5. (a) Serra-copo utilizada pra extrair CP de MAF, (b) Furadeira de bancada com serra-copo. | 25 |
| Figura 3.6. Esquema geral do teste de módulo dinâmico. | 26 |
| Figura 3.7. Reômetro de Cisalhamento Dinâmico AR 2000®. | 27 |
| Figura 3.8. (a) CP de CAP acoplado ao DSR e (b) Amostra de CAP com 25mm de diâmetro. | 28 |
| Figura 3.9. CP de MAF acoplado no DSR. | 29 |
| Figura 4.1. Resultado de módulo dinâmico para o CP1, mistura completa com CAP 50/70. | 31 |
| Figura 4.2. Resultado de módulo dinâmico para o CP2, mistura completa com CAP 50/70. | 31 |
| Figura 4.3. Curva mestra CP1 e CP2 (mistura completa com CAP 50/70), temperatura de referência de 21,1°C. | 32 |
| Figura 4.4. Resultado de módulo dinâmico para o CP3, mistura completa com CAP 50/70 + SBS. | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.5. Resultado de módulo dinâmico para o CP4, mistura completa com CAP 50/70 + SBS. | 34 |
| Figura 4.6. Curva mestra CP3 e CP4 (mistura completa com CAP 50/70 + SBS), temperatura de referência de 21,1°C. | 35 |
| Figura 4.7. Curva mestra CAP 50/70, temperatura de referência de 20°C. | 36 |
| Figura 4.8. Curva mestra CAP 50/70 + 4,5% SBS, temperatura de referência de 20°C. | 37 |
| Figura 4.9. Resultado de módulo dinâmico para o CP5, MAF com CAP 50/70. | 38 |
| Figura 4.10. Curva mestra CP5, MAF com CAP 50/70, temperatura de referência de 21,1°C. | 39 |
| Figura 4.11. Resultado de módulo dinâmico para o CP6, MAF com CAP 50/70 + 4,5 de SBS. | 40 |
| Figura 4.12. Curva mestra CP6, MAF com CAP 50/70 + 4,5% SBS, temperatura de referência de 21,1°C. | 40 |
| Figura 4.13. Comparação das curvas mestras de misturas completas com CAP convencional e modificado. | 42 |
| Figura 4.14. Comparação das curvas mestras de CAP convencional e modificado. | 43 |
| Figura 4.15. Comparação das curvas mestras de MAF com CAP convencional e modificado. | 44 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1. Dimensões das peneiras (DNER-ME 035/95) | 9 |
| Tabela 3.1. Propriedades CAP 50/70 (Petrobras, 2009). | 21 |
| Tabela 3.2. Caracterização dos agregados (Oliveira, 2009). | 21 |
| Tabela 3.3. Parâmetro de dosagem. | 23 |
| Tabela 3.4. Parâmetro de dosagem MAF | 24 |
| Tabela 3.5. Tempo de equilíbrio da temperatura e intervalo de tensão. | 26 |
| Tabela 4.1 - Fator de deslocamento para misturas completas. | 32 |
| Tabela 4.2 - Fator de deslocamento (a_i) para o CAP. | 36 |
| Tabela 4.3 - Fator de deslocamento (a_i) para a MAF. | 39 |

LISTA DE SÍMBOLOS

- $a_t(T)$ – Fator de Deslocamento
- C – Constante
- CA** – Concreto Asfáltico
- CAP** – Cimento Asfáltico de Petróleo
- CBUQ** – Concreto Betuminoso Usinado a Quente
- E_a – Energia de ativação
- ElvaloyR** – Etilenoglicidilacrilato
- EVA** – Etilenovinilacetato
- $|G^*|$ – Módulo Dinâmico
- MAF** – Matriz de Agregados Finos
- R** – Constante dos gases
- SBS** – Estireno–Butadieno–Estireno
- SEBS** – Estireno–(etileno-co-butileno)–Estireno
- T** – Temperatura
- MTC** – Material Termoreologicamente Complexo
- T_g – Temperatura Vítea
- T_{ref} – Temperatura de Referência
- MTS** – Material Termoreologicamente Simples
- f – Frequência
- WLF** – Williams-Landel-Ferry
- DSR** – *Dynamical Shear Rheometer*
- LVDT** – *Linear Variable Differential Transformer*
- CGS** – Compactador Girstório Superpave
- G_{mm} – Massa Específica Máxima da Mistura

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este capítulo destaca a importância do tema escolhido pelo autor, o problema de pesquisa, os objetivos são apresentados e, por fim, a estrutura desta monografia é detalhada.

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Desde muito cedo, os investimentos brasileiros em transportes são aplicados no desenvolvimento da infra-estrutura rodoviária. Apesar da extensão da malha rodoviária brasileira, apenas 10,3% das vias são pavimentadas e, dessa percentagem, acredita-se que 54,5% encontra-se com o pavimento em estado regular, ruim ou péssimo. Desta forma, de imediato, para que o sistema rodoviário atinja níveis satisfatórios de desempenho, estima-se uma soma de investimentos de aproximadamente R\$ 23,6 bilhões, e para a correta manutenção da malha, investimentos de R\$ 1,34 bilhões por ano (CNT, 2007). A má condição da grande parte das rodovias brasileiras eleva os custos de transportes e estes custos são repassados aos produtos, com impacto negativo na economia nacional. Com isso, estima-se que nos próximos anos grandes incentivos para a recuperação da infra-estrutura viária nacional serão necessários. Este fato justifica um plano de pesquisa que vise o desenvolvimento de métodos para melhor prever o número de solicitações de tráfego necessárias para causar um nível aceitável de dano aos pavimentos asfálticos.

A grande maioria das rodovias brasileiras é formada por pavimentos flexíveis. Este tipo de pavimento apresenta uma camada superficial de mistura asfáltica, o que torna seu comportamento dependente do tempo, da taxa de carregamento e da temperatura. Sabe-se, portanto, que este comportamento pode ser mais realisticamente representado por modelos viscoelásticos (Huang, 2004).

Apesar de reconhecer o comportamento destes materiais como viscoelástico é importante destacar que o uso de métodos empíricos no projeto de misturas, modelos de comportamento dos materiais de pavimentação e modelos de falha de pavimentos ajudaram, no passado, pesquisadores e engenheiros a entender melhor os fatores que influenciam o comportamento dos pavimentos (Huang, 2004).

A literatura mostra que a temperatura é um fator que tem grande influência na resposta viscoelástica (Lu e Wright, 2000; Elseifi *et al.*, 2006). Verifica-se que o aumento da temperatura aumenta a parcela viscosa do comportamento viscoelástico enquanto que a redução da temperatura aumenta a parcela elástica, tornando o material mais rígido. Contudo, quantificar a influência da temperatura nas propriedades viscoelásticas é uma tarefa complexa para a maioria dos materiais.

Este trabalho apresentará uma avaliação sobre a influência da temperatura no comportamento de materiais asfálticos. Este estudo tem como objetivo avaliar se estes materiais podem ser considerados termo-reologicamente simples (MTS), ou seja, se a relação tempo/temperatura pode ser descrita por modelos simplificados, o que facilita sua caracterização em laboratório. Para isso, serão estudadas três diferentes escalas, sendo elas: (i) mistura asfáltica completa, (ii) Matriz de Agregados Finos (MAF), e (iii) Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Para estas análises será utilizado um tipo de CAP classificado por penetração, sendo este natural e modificado. Para estes estudos serão realizados ensaios de módulo dinâmico para as diferentes escalas dos materiais.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

O problema abordado neste trabalho pode ser descrito como o estudo da influência da temperatura na viscoelasticidade de materiais asfálticos utilizados na pavimentação. Sendo que este trabalho tenta responder os seguintes questionamentos:

“De que forma a temperatura influencia o comportamento viscoelástico de misturas asfálticas completas, da MAF, e do CAP?”

“O comportamento de materiais asfálticos pode ser aproximado como termo-reologicamente simples?”

“Qual o efeito da modificação do CAP com SBS no que diz respeito à rigidez dos materiais estudados?”

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar o efeito da temperatura na resposta viscoelástica em três escalas: (i) mistura completa, (ii) MAF, e (iii) CAP.

Os objetivos específicos são:

- Elaborar um método para ensaio de módulo dinâmico da MAF;
- Avaliar a aplicabilidade da equação de Arrhenius para o fator de deslocamento na construção de curvas mestras para as três escalas;
- Avaliar, para cada uma das escalas, se o comportamento do material pode ser aproximado como termo-reologicamente simples;
- Verificar o efeito da modificação do CAP com SBS no que diz respeito a rigidez dos materiais estudados.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1 foi discutida a importância do tema escolhido, o problema e as questões de pesquisa, os objetivos e ainda a estrutura do presente trabalho foram apresentados. No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os tópicos relevantes para a compreensão do tema, a partir de bibliografias nacionais e internacionais.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia adotada para a realização deste trabalho. São apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa e os experimentos realizados para testar estes materiais.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios realizados e a análise dos mesmos. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões resultantes da realização deste trabalho e sugestões para estudos futuros nesta mesma linha de pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)

O CAP é um produto oriundo da destilação do petróleo, sendo obtido através de diversas técnicas de destilação. Possui coloração de marrom escura para preta, com características aglutinantes e impermeabilizantes. É um cimento forte e com grande durabilidade.

Quando aquecido o CAP se comporta como um líquido o que faz com que ele seja facilmente misturado com os agregados para que seja formada a mistura asfáltica, que é aplicada e compactada ainda a elevadas temperaturas. Ao retornar à temperatura ambiente o CAP se comporta como um semisólido que apresenta comportamento viscoelástico, ou seja, dependente do tempo e da taxa de carregamento. O comportamento pode ser aproximado como elástico quando o tráfego é rápido (elevadas frequências de carregamento) e como viscoso quando o tráfego é lento (baixas frequências de carregamento).

Este material possui uma composição química complexa variável de acordo com o petróleo e o processo de refino, sendo um composto formado basicamente por hidrocarbonetos de elevada massa molecular (betume) e alguns metais. Isto faz com que ele seja pouco reativo e apresente resistência à ação de ácidos, bases e sais o que garante uma boa durabilidade e a manutenção de suas propriedades físicas. Porém o contato com o ar acarreta um processo de oxidação lenta, que pode ser acelerado a altas temperaturas. Esta oxidação provoca mudança nas propriedades físicas do CAP o que faz com que sua resistência seja comprometida. Com isso, para eliminar os riscos de envelhecimento

precoce, deve-se evitar altas temperaturas de usinagem e espalhamento assim como um alto teor de vazios na estrutura da mistura asfáltica.

O CAP pode ser classificado pela sua penetração ou viscosidade. A classificação pela penetração é especificada pelas normas **ASTM D946** ou **DNER 003-99** e é controlada pelo teste de penetração.

2.1.1. Teste de Penetração

Este teste empírico é feito para medir a consistência do CAP. De uma forma geral ele é realizado a uma temperatura de 25°C, pois esta é a temperatura de serviço aproximada dos pavimentos asfálticos. Esta temperatura é mantida por um banho térmico de água termostaticamente controlado. Assim, a amostra é posicionada sob uma agulha de dimensões prescritas e carregada com um peso de 100g. Esta agulha é liberada por 5 segundos e então é medida a penetração que a agulha atingiu na amostra, como pode ser observado na Figura 2.1 (Roberts *et al.*, 1996).

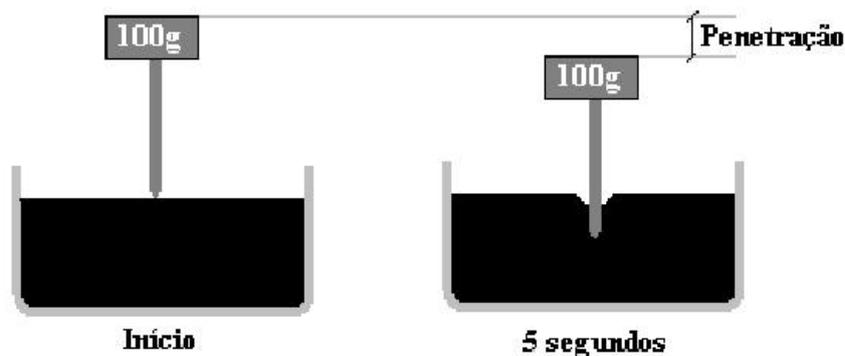


Figura 2.1. Teste de Penetração.

A profundidade da penetração é medida na unidade de 0,1mm, ou uma unidade de penetração. Por exemplo, caso a penetração da agulha seja de 5mm, a penetração do CAP é 50.

2.1.2. Ligante Modificado

Devido à grande necessidade de melhorar as propriedades físicas do CAP convencional alguns aditivos (modificadores) são incorporados a este material, podendo torná-lo mais resistente à deformação permanente, ao trincamento por fadiga ou de origem térmica. Estes modificadores podem ser diversos tipos de substâncias como: polímeros, borrachas e fileres. Dentre estas substâncias destacam-se os polímeros, pois uma grande variedade destes materiais vêm sendo utilizada como aditivo para CAP's. Entre estes, copolímeros de estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-(etileno-co-butileno)-estireno (SEBS), etilenovinilacetato (EVA) e etilenoglicidilacrilato (Elvaloy®) têm demonstrado apresentar uma melhoria nas propriedades reológicas do ligante, aumentando o desempenho deste durante a vida útil do pavimento (Polacco *et al.*, 2006; Yildirim, 2007; Sengoz e Isikyaka, 2008).

O copolímero SBS, por exemplo, tem demonstrado habilidade para combinar propriedades elásticas, de força e de adesão. A melhoria das propriedades também inclui maior resistência ao envelhecimento e à oxidação (Airey, 2003; Polacco *et al.*, 2006). Assim, as características viscoelásticas dos CAP's são modificadas em regime de altas temperaturas, resultando em pavimentos mais resistentes à deformação permanente e ao envelhecimento (Sengoz *et al.*, 2009).

2.2. AGREGADOS

Os agregados utilizados em revestimentos asfálticos, segundo a norma ABNT NBR 9935 (2005) são materiais sem forma ou volume definido, geralmente inertes, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa e de concreto. Segundo Woods (1960) agregado é, basicamente, uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada e

outros materiais minerais usada em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa, etc.

O agregado apresenta um papel importante para o projeto de pavimentos asfálticos duráveis em sua vida de serviço. Para isso, é necessário conhecer as propriedades destes agregados. O agregado escolhido deve apresentar propriedades de modo a suportar as tensões impostas na superfície do pavimento e também no seu interior (Bernucci *et al.*, 2007). A classificação dos agregados se faz de acordo com a natureza, tamanho e distribuição dos grãos.

Natureza:

De acordo com a natureza, o agregado pode ser natural ou artificial. Os agregados naturais são obtidos a partir da exploração de depósitos continentais, marinhos e rios. Esta exploração é feita a partir de técnicas convencionais de escavação, desmonte e drenagem. Exemplos de rochas utilizadas são calcário, basalto e quartzito. Já os artificiais são oriundos de processos industriais, tais como escórias de alto-forno, diversos tipos de argilas, resíduos da construção civil ou algum material produzido com o intuito de aumentar o desempenho do pavimento.

Tamanho:

Quanto ao tamanho, o agregado pode ser classificado como miúdo, graúdo ou filer. O graúdo tem dimensões maiores que 2,0mm (retidos na peneira #10), o miúdo tem dimensões entre 2,0mm e 0,075mm (passam pela peneira #10 e são retidos pela peneira #200) e o filer tem, pelo menos, 65% das partículas menores que 0,075mm (Peneira #200).

Distribuição dos Grãos:

A granulometria é uma das principais características do agregado, pois influi de maneira direta no comportamento da mistura asfáltica. Ela é geralmente determinada por análise através de peneiramento, onde a amostra seca de agregado é submetida a um processo de fracionamento através de várias peneiras com abertura de malha de tamanho decrescente. A massa retida em cada peneira é comparada com a total e assim, a granulometria é feita com a percentagem de massa retida em cada peneira. De acordo com a DNER-ME 035/95 os tamanhos das peneiras que devem ser utilizadas são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Dimensões das peneiras (DNER-ME 035/95)

| Abertura da Peneira (mm) | Número da Peneira |
|--------------------------|-------------------|
| 75,0 | - |
| 50,0 | - |
| 37,5 | - |
| 25,0 | - |
| 19,0 | - |
| 9,5 | - |
| 4,75 | 4 |
| 2,36 | 8 |
| 2,0 | 10 |
| 1,18 | 16 |
| 0,6 | 30 |
| 0,425 | 40 |
| 0,3 | 50 |
| 0,15 | 100 |
| 0,075 | 200 |

2.3. MISTURA ASFÁLTICA

Os pavimentos asfálticos são constituídos, basicamente, da associação entre o CAP, os agregados e alguns possíveis aditivos. Estas misturas podem ser feitas de diversas

formas. Um dos tipos mais empregados no Brasil é o Concreto Asfáltico (CA) também denominado Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Trata-se de um produto da mistura convenientemente proporcionada de agregados de vários tamanhos e CAP, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas em função da relação viscosidade versus temperatura do ligante. Neste trabalho será utilizado o método de dosagem Superpave que desde 1993 vem substituindo parcialmente as metodologias Marshall e Hveem. Uma explicação detalhada do método Superpave pode ser obtida em Bernucci *et al.* (2007).

2.3.1. Matriz de Agregados Finos (MAF)

Enquanto uma mistura completa é constituída de CAP, agregados miúdos e graúdos e filer, a MAF é constituída, basicamente, de CAP, agregados miúdos e filer. Em uma mistura asfáltica a parte fina exerce influência relevante em seu comportamento mecânico. Geralmente, seus efeitos são de caráter volumétrico ou de interações na interface entre o CAP, os finos e o filer, fator resultante das dimensões, e propriedades químicas dos finos. As interações na interface estão baseadas nas interações físico-químicas, proporcionadas por propriedades tais como a geometria, tamanho e superfície de contato da parte fina, e que resultam em maior ou menor intensidade de adsorção na interface ligante-filer (Souza, 2007). A partir deste conhecimento surgiu a idéia de investigar as propriedades da MAF.

O estudo da parte fina da mistura é motivado pela influência que esta exerce na mistura asfáltica, pois acredita-se que grande parte dos danos por fadiga ocasionados na mistura completa inicia-se na região constituída de ligante, agregados miúdos e filer. Outro motivo relevante é a uniformidade da estrutura interna da MAF em relação a mistura completa, como pode ser observado na Figura 2.2. Além disso, por se utilizar amostras de tamanho reduzido (cilindros de aproximadamente 12mm de diâmetro e 50mm de altura), há

uma considerável economia de material e tempo além da geração de grande volume de dados o que facilita na análise estatística dos resultados.

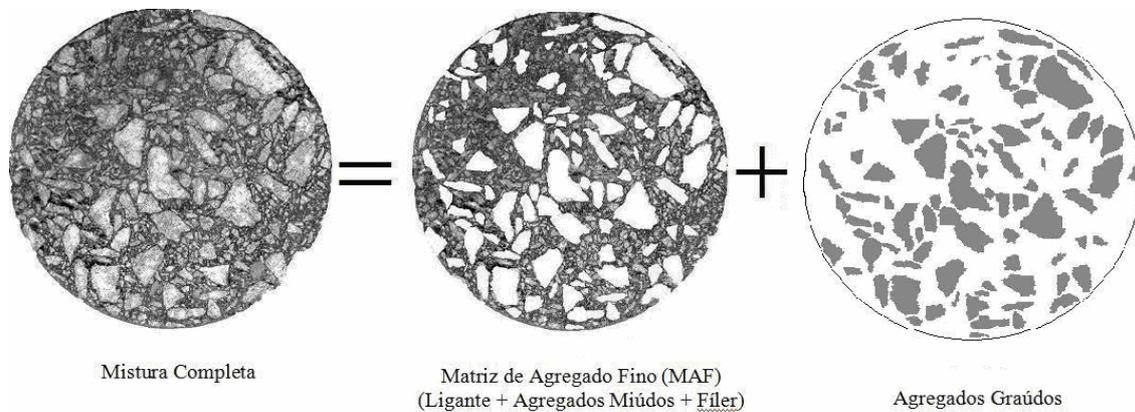


Figura 2.2. Estrutura da mistura completa e da MAF.

2.4. VISCOELASTICIDADE

Como já foi mencionado anteriormente, o CAP é um material que apresenta comportamento viscoelástico, ou seja, um comportamento mecânico dependente do tempo e da temperatura. Com intuito de caracterizar corretamente as misturas asfálticas, é necessária a obtenção de parâmetros compatíveis com os efeitos viscoelásticos, permitindo o estudo e análise de tensões (σ) e deformações (ϵ) (Huang, 2004; Evangelista *et al.*, 2006).

Sabe-se que se considerarmos uma escala de tempo longa o suficiente, uma grande quantidade de materiais (praticamente todos) tem comportamento caracterizado pela dependência do módulo de elasticidade no tempo. Em alguns materiais esta dependência do módulo no tempo se manifesta numa escala de tempo muito longa (séculos) enquanto que em outros materiais a manifestação desse comportamento é mais rápida (segundos) (Portela, 2008).

De maneira simples os materiais viscoelásticos podem ser interpretados como uma combinação do comportamento de materiais elásticos e viscosos. Isto pode ser feito porque quando materiais viscoelásticos são submetidos a carregamentos rápidos (altas frequências), estes exibem um comportamento próximo ao dos sólidos elásticos e, em contrapartida, quando se aplica carregamentos a uma taxa lenta (baixas frequências), o material apresenta deformações permanentes com o passar do tempo, assemelhando-se ao comportamento dos fluidos viscosos.

Porém, os materiais elásticos e os viscosos têm comportamentos constitutivos consideravelmente diferentes. Materiais elásticos deformados retornam facilmente ao seu estado original quando removido o carregamento. Ao contrário, os materiais viscosos tendem a não voltar para o estado indeformado quando retirado o carregamento (Portela, 2008).

Os materiais viscoelásticos se caracterizam, principalmente, pelo fato de que a deformação em um dado instante é determinada não apenas pelo correspondente valor de tensão naquele instante, mas também por todo o histórico de tensão ao qual o material foi submetido (Christensen, 1982). Esta hipótese é válida tanto para materiais viscoelásticos lineares como para os não-lineares. No entanto, a teoria da viscoelasticidade linear é restrita a condições de deformabilidade infinitesimal, as quais são satisfeitas em muitos problemas teóricos (Soares e Souza, 2002).

Com isso, é muito comum na engenharia, principalmente nos procedimentos de dimensionamento de estruturas, considerarem-se apenas o comportamento elástico linear dos materiais. Esta consideração é justificada pelo fato de que, para pequenas deformações, a maior parte dos materiais, para aplicações estruturais, segue a Lei de Hooke (Beer e Johnson, 1996). É importante ressaltar que os materiais asfálticos são considerados termo-viscoelásticos devido à forte influência que a temperatura exerce sobre o seu comportamento.

2.5. EFEITO DA TEMPERATURA

Baseado nas diferentes respostas reológicas que são obtidas a diferentes temperaturas, os materiais podem ser classificados como Materiais Termoreologicamente Simples (MTS) ou Materiais Termoreologicamente Complexos (MTC). Se a temperatura afeta principalmente a propriedade do material com relação à dependência do tempo e caso o efeito da temperatura possa ser incorporado pelo simples uso de um fator de deslocamento, *shift factor*, na escala de tempo, o material pode ser considerado um MTS. Por outro lado, para o MTC, a temperatura influencia nas propriedades iniciais (elástica), de longo prazo (equilíbrio) e dependentes do tempo dos materiais (Muliana, 2008). De acordo com a literatura quando estes materiais se encontram em sua fase viscoelástica linear, o Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT) pode ser considerado, o que indica que o material pode ser classificado como MTS (Shames e Cozzarelli, 1997; Lakes, 1998; Roylance, 2001).

A idealização da resposta termo-viscoelástica dos materiais asfálticos como sendo MTS é suficiente quando o material é sujeito a mudanças de temperaturas moderadas e quando a temperatura não varia com o tempo ou quando o material está sendo exposto a constantes taxas de variação de temperaturas e cargas mecânicas. Isto implica que o mesmo valor para uma propriedade do material pode ser obtido para altas frequências (pequenos tempos de carregamento) e para baixas temperaturas, assim como para baixas frequências (longo tempo de carregamento) e altas temperaturas (Medani e Huurman, 2003).

2.5.1. Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT)

O PSTT afirma que dados de viscoelasticidade obtidos para diferentes temperaturas podem ser superpostos em uma curva mestra. Isto é feito através de deslocamentos horizontais ao longo do eixo logarítmico da frequência ou do tempo

(Klompen e Govaert, 1999). Para este tipo de material considerado simples, a mudança da temperatura vai deslocar a resposta viscoelástica do material sem mudança na forma da curva mestra. Assim, o fator de deslocamento tempo temperatura, a_t , pode ser definido como o deslocamento horizontal que deve ser aplicado a uma curva mestra que foi medida a uma temperatura arbitrária, T , a fim de movê-la para a curva de temperatura de referência, T_{ref} . Isto é mostrado esquematicamente na Figura 2.3.

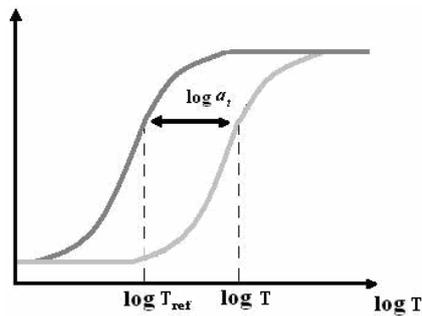


Figura 2.3. Fator de deslocamento (a_t) tempo-temperatura.

Este fator de deslocamento pode ser determinado de diferentes formas, dentre elas: (i) equação de Arrhenius ou (ii) equação de Williams-Landel-Ferry (WLF). De acordo com Cheung (1995), caso a diferença entre a temperatura a ser deslocada e a temperatura de referência ($T-T_{ref}$) seja menor ou igual a 20°C a equação de Arrhenius fornece um melhor ajuste dos resultados. Por outro lado, quando ($T-T_{ref}$) é maior que 20°C a equação WLF é mais indicada.

Equação de Arrhenius

A equação de Arrhenius é, comumente, o método mais utilizado para determinação do fator de deslocamento de misturas asfálticas, pois oferece um melhor ajuste nos dados, sendo representada pela Equação (2.1) abaixo.

$$\log a_t = C \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) = \frac{E_a}{2,303 \cdot R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad 2.1$$

Onde C é a constante do material (K), E_a é a energia de ativação (J/mol), R é a constante dos gases ideais (8,314J/mol.K), T é a temperatura experimental (K), T_{ref} é a temperatura de referência (K) e o valor 2,303 corresponde ao logaritmo natural do número 10.

Na literatura valores distintos para a energia de ativação para diferentes CAP's podem ser encontrados. Estes valores podem variar de 44 kJ/mol a 205 kJ/mol, o que faz com que os valores de C também variem para cada tipo de mistura asfáltica. Medani *et al.* (2003) citam diferentes valores para esta constante, C , como 10.920 K, 13.060 K e 7.680 K. No caso específico da mistura asfáltica completa C pode ser considerado igual a 10.500 K.

Equação de Williams-Landel-Ferry (WLF)

A equação de WLF é outra formulação bastante utilizada para o cálculo do fator de deslocamento de materiais viscoelásticos, devendo ser usada para temperaturas próximas ou superiores à temperatura vítrea (T_g) do material. Nesta formulação o fator de deslocamento é dado por:

$$\log a_t = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad 2.2$$

Onde a constante C_1 é adimensional e a constante C_2 tem unidade de temperatura (K). Estas constantes dependem das propriedades de cada material e da temperatura de referência, T_{ref} .

2.6. CURVA MESTRA

As curvas mestras servem para avaliar o desenvolvimento de uma propriedade reológica qualquer em função da frequência ou do tempo de aplicação do carregamento, descrevendo o comportamento reológico do material para uma única temperatura em um espectro amplo de tempos ou frequências de carregamento. Com base nos fatores de deslocamento obtidos na geração das curvas mestras, é possível deslocar horizontalmente a curva mestra gerada na temperatura de referência e obter uma nova curva, capaz de descrever o comportamento reológico do material ao longo do mesmo espectro de frequências ou tempos de carregamento, na temperatura desejada. Em função das suas potencialidades, as curvas mestras representam uma ferramenta importante na caracterização de materiais asfálticos ao longo de uma faixa ampla de temperaturas e tempos ou frequências de carregamento.

2.6.1. Construção de Curva Mestra

Para a construção de uma curva mestra através do PSTT é necessário realizar uma coleta de dados de ensaios dinâmicos, que devem ser realizados a diferentes frequências e temperaturas. Depois de coletados todos os dados, deve ser selecionada uma temperatura de referência. Assim, os dados dos ensaios realizados nas demais temperaturas devem ser deslocados na escala do tempo até encontrar com a curva da temperatura de referência. Esta translação pode ser feita com base em qualquer uma das funções viscoelásticas, pois, se o PSTT for válido, todas as funções viscoelásticas irão formar funções contínuas após a translação (Christensen, 1982).

Para este trabalho a curva mestra será elaborada com base nos dados de módulo dinâmico ($|G^*|$) pela frequência (f), lembrando que estes dados serão plotados em escala logarítmica. Abaixo pode ser observado um exemplo que explica, esquematicamente, como a curva mestra deve ser montada.

O primeiro passo para a construção destas curvas é plotar os dados de $|G^*|$ por f em escala logarítmica, como pode ser observado na Figura 2.4. Em seguida é escolhida a T_{ref} (neste exemplo será 5°C) e aplicado o fator de deslocamento nas demais temperaturas (Figuras 2.5 e 2.6). Ao final deste procedimento será obtida a curva mestra (Figura 2.7).

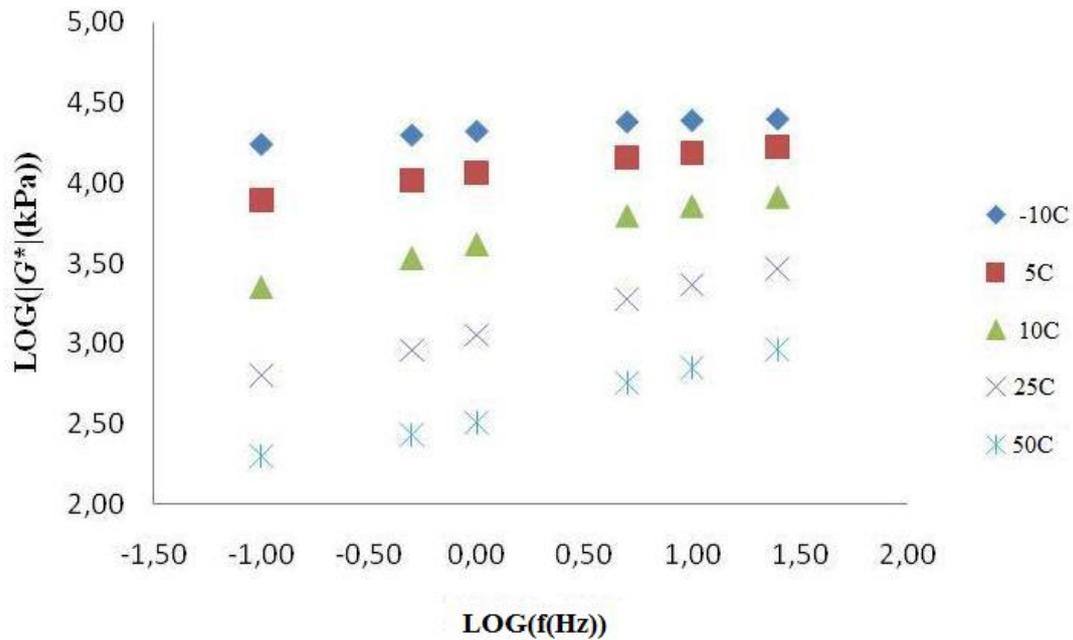


Figura 2.4. Dados obtidos para módulo dinâmico para diferentes frequências e temperaturas.

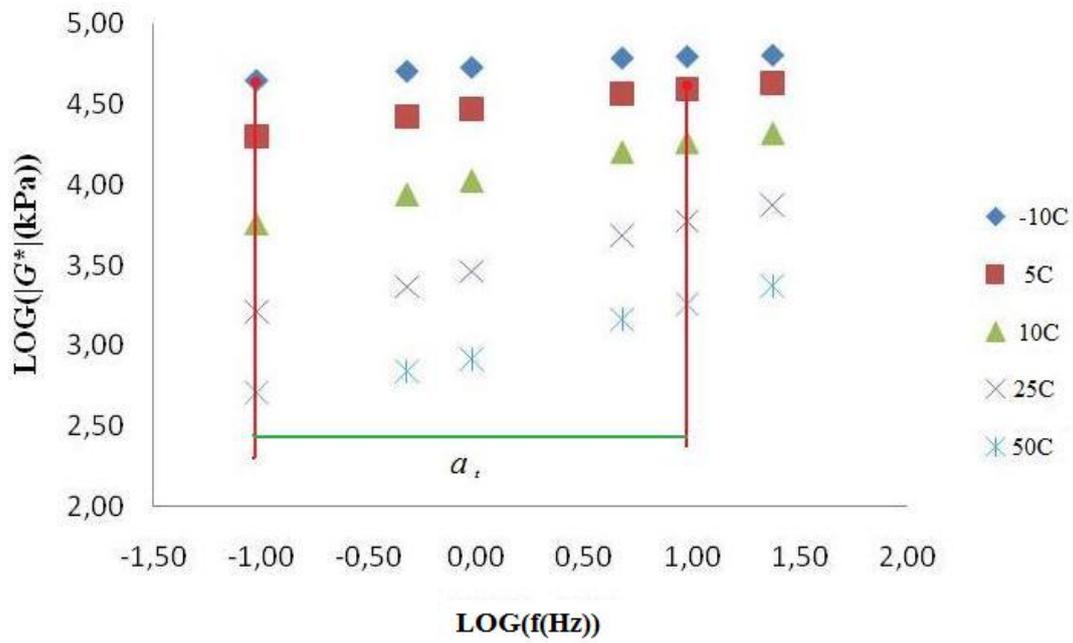


Figura 2.5. Aplicação do fator de deslocamento (a_t).

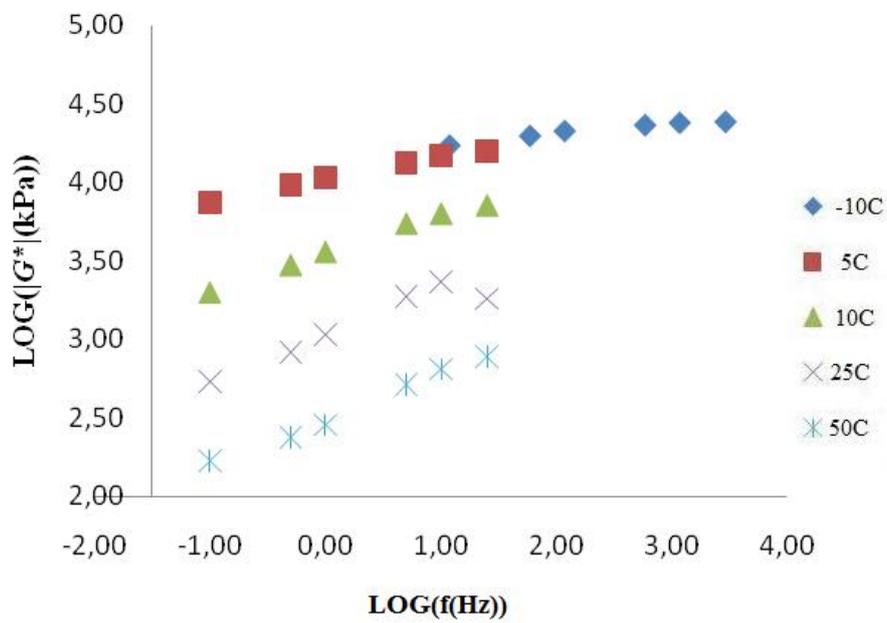


Figura 2.6. Dados deslocados para a curva da temperatura de referência.

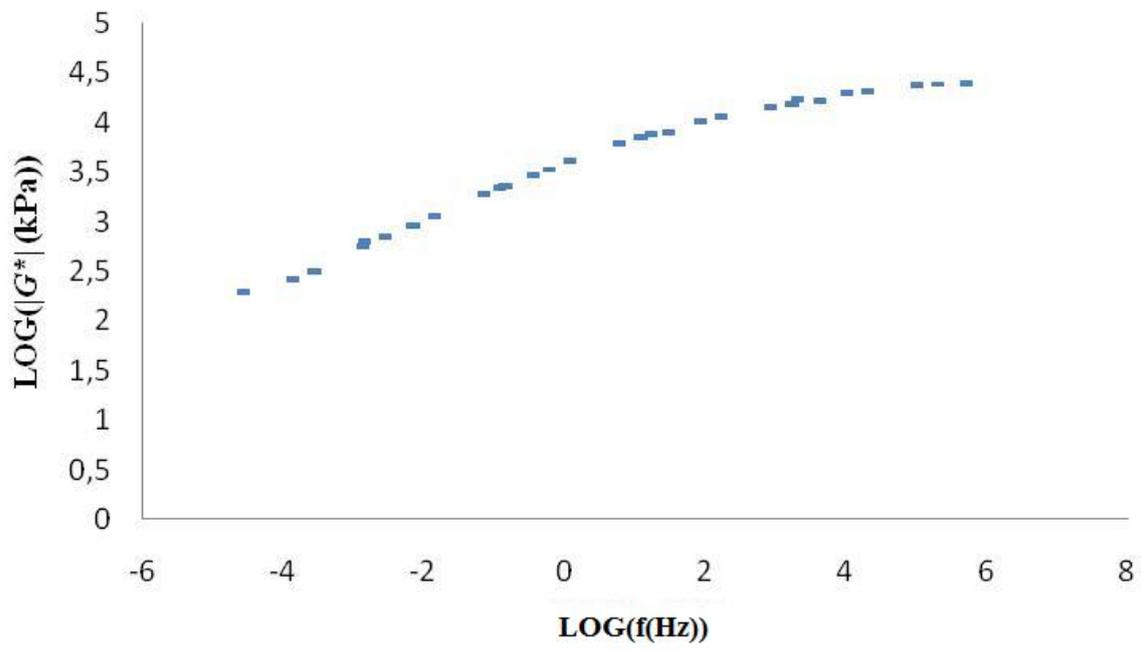


Figura 2.7. Curva mestra para a temperatura de referência de 5°C.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia adotada neste trabalho incluindo a descrição dos ensaios mecânicos realizados.

3.1 MATERIAIS EMPREGADOS

Neste trabalho foi utilizado um CAP convencional e um modificado, sendo eles: (i) CAP 50/70 e (ii) CAP 50/70 + 4,5% em massa de SBS. O ligante modificado foi preparado por um misturador de alto cisalhamento de escala laboratorial, Silverson L4R® (Figura 3.1). Para este procedimento foi utilizada uma rotação de 3000 RPM para o impelidor cisalhante e uma temperatura de 160°C por um período de 2 horas.



Figura 3.1. Misturador Silverson L4R®.

O CAP 50/70 foi fornecido pela Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste Petrobras (Lubnor), oriundo do campo de petróleo Fazenda Alegre, do estado do Espírito Santo. Os dados das propriedades deste material estão expostos na Tabela 3.1. O polímero SBS foi fornecido pela Petroflex Ind. e Com. S/A.

Tabela 3.1. Propriedades CAP 50/70 (Petrobras, 2009)

| Característica | Método | Especificação | Resultado | Unidade |
|---|--------|---------------|-----------|---------|
| PENETRACAO | D 5 | 50 a 70 | 60 | 0,1 mm |
| PONTO DE AMOLECIMENTO | D 36 | 46 min | 51 | °C |
| VISCOSIDADE SAYBOLT FUROL A 135 °C | E 102 | 141 min | 229 | s |
| VISCOSIDADE BROOKFIELD 135°C-SP21 20RPM | D 4402 | 274 min | 450 | cp |
| VISCOSIDADE BROKFIELD 150 °C-SP21 | D 4402 | 112 min | 221 | cp |
| VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177°C SP21 | D 4402 | 57 a 285 | 79 | cp |
| RTFOT PENETRACAO RETIDA | D 5 | 55 min | 65 | % |
| RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO | D 36 | 8 máx | 7,6 | °C |
| RTFOT - DUCTILIDADE A 25°C | D 113 | 20 min | >150 | cm |
| RTFOT VARIACAO EM % MASSA | D 2872 | 0,5 máx | -0,038 | % |
| DUTILIDADE A 25 °C | D 113 | 60 min | >150 | cm |
| SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO | D 2042 | 99,5 min | 100 | % massa |
| PONTO DE FULGOR | D 92 | 235 min | >300 | °C |
| INDICE DE SUSCETIBILIDADE TERMICA | X 018 | -1,5 a 0,7 | -0,5 | N/A |

Os agregados utilizados neste trabalho são naturais de origem granítica e provenientes da Pedreira de Itaitinga – CE, situada a 30km de Fortaleza. Foram utilizados como agregado graúdo as britas 3/4” e 3/8”, como agregado miúdo pó de pedra da mesma pedreira e como material de enchimento utilizou-se o filer natural. Estes agregados foram previamente caracterizados por Oliveira (2009) e suas propriedades estão dispostas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Caracterização dos agregados (Oliveira *et al.*, 2009)

| Agregado | Propriedade | | | | | |
|-------------|----------------|--------------------|--------------|-------------------------|-----------------|---|
| | Densidade Real | Densidade Aparente | Absorção (%) | Abrasão Los Angeles (%) | Índice de Forma | Massa Específica Real do Filer (g/cm ³) |
| Brita 3/8” | 2,66 | 2,58 | 1,20 | - | - | - |
| Brita 3/4” | 2,66 | 2,62 | 0,62 | 42,18 | 0,68 | - |
| Pó de Pedra | 2,64 | - | - | - | - | 2,68 |

Neste trabalho também foram utilizadas duas misturas asfálticas completas (uma com ligante modificado e uma com ligante convencional) e duas MAF’s (sendo uma com ligante modificado e uma com ligante convencional).

3.1.2. Dosagem das Misturas

A dosagem das duas misturas completas do tipo CA foi feita seguindo a metodologia de dosagem Superpave. A premissa principal da dosagem Superpave é que a quantidade de ligante usada deve ser tal que a mistura atinja 4% de vazios no número de giros de projeto (70 giros). Caso isso não ocorra, faz-se uma estimativa do teor de ligante que atenderia a tal premissa. O corpo de prova, CP, do tipo CA possui aproximadamente 100mm de diâmetro e uma altura de 150mm.

A distribuição granulométrica para as misturas com os dois tipos de CAP e os limites estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) para a faixa “C” são apresentados na Figura 3.2. Foram projetados dois CP’s para cada mistura e a Tabela 3.3 mostra o resumo dos parâmetros de dosagem obtidos através do método Superpave para cada um desses CP’s, onde G_{mm} é a massa específica máxima da mistura. O teor ótimo da mistura com o CAP 50/70 convencional foi de 6,0% e com o CAP 50/70 + 4,5% SBS foi de 6,3%.

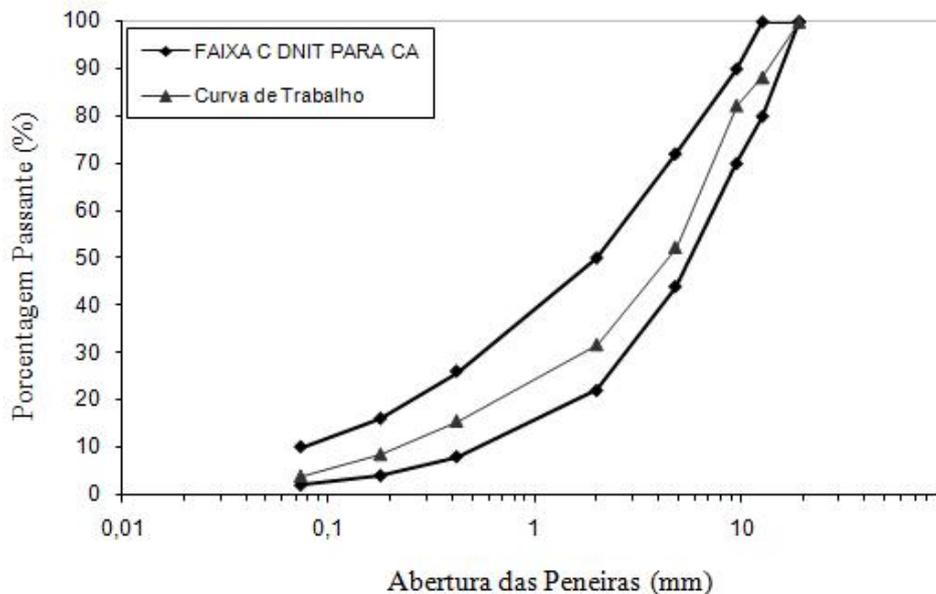


Figura 3.2. Distribuição granulométrica dos agregados com limites máximo e mínimo estabelecidos pelo DNIT para a faixa “C”, mistura do tipo CA.

Tabela 3.3. Parâmetro de dosagem.

| Parâmetros | Amostra / CAP | | | |
|----------------------|---------------|-----|-----------------|-----|
| | CAP 50/70 | | CAP 50/70 + SBS | |
| | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 |
| Teor de ligante (%) | 6,0 | | 6,3 | |
| Volume de vazios (%) | 4,4 | 4,1 | 4,0 | 3,7 |
| G _{mm} | 2,401 | | 2,397 | |

3.1.2. Dosagem das MAF's

As amostras de MAF foram produzidas de acordo com a metodologia sugerida por Castelo Branco (2008), modificando apenas o teor de ligante, que será 30% menor do que o proposto. Esta redução foi aplicada, pois, por questões práticas, não foi possível moldar e extrair as amostras de MAF com 100% do teor de ligante encontrado.

O método consiste na tentativa de obter uma amostra de MAF representativa desta fase da mistura asfáltica completa. Inicialmente, foram misturados os constituintes (agregados miúdos, filer e ligante) e, em seguida, esta mistura foi compactada (a distribuição granulométrica pode ser encontrada na Figura 3.3 e os parâmetros de dosagem na Tabela 3.3). A compactação dos CP's de MAF foi feita em um compactador giratório Superpave utilizando 200 giros o que acarretou em um volume de vazios muito próximo de 0%. Este baixo percentual de vazios foi certamente acarretado pelo alto percentual de ligante utilizado nestas misturas.

Após a compactação as partes superior e inferior dos CP's são serradas, a fim de produzir um cilindro de 100mm de diâmetro por 50mm de altura. A partir deste novo CP cerca de 20 amostras de MAF são extraídas. Estas amostras possuem, aproximadamente, 12mm de diâmetro por 50mm de altura, como ilustrado na Figura 3.4.

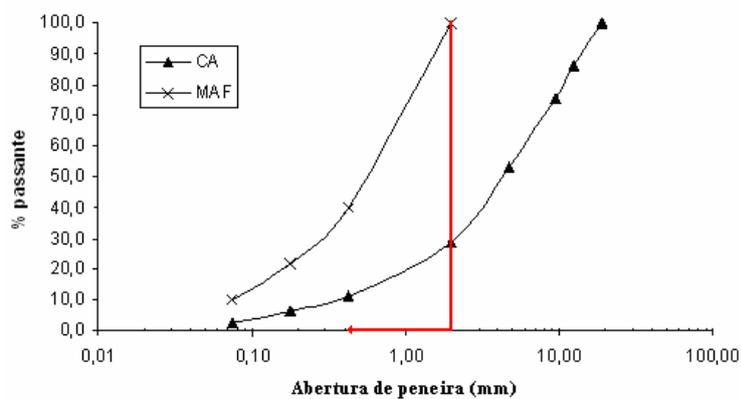


Figura 3.3. Distribuição granulométrica dos agregados na MAF.



Figura 3.4. CP de MAF extraído a partir de um CP do CGS.

Tabela 3.4 Parâmetro de dosagem MAF

| Parâmetros | CAP 50/70 | CAP 50/70 + 4,5% SBS |
|----------------------|-----------|----------------------|
| | CP5 | CP6 |
| Teor de ligante (%) | 11,7 | 12,2 |
| Volume de vazios (%) | 0,9 | 0,8 |
| G_{mm} | 2,157 | 2,159 |

A extração destes CP's foi feita com uma serra-copo acoplada em uma furadeira de bancada, representados nas Figuras 3.5 (a) e (b). Esta furadeira possui um sistema de refrigeração (interno e externo) a ar comprimido.

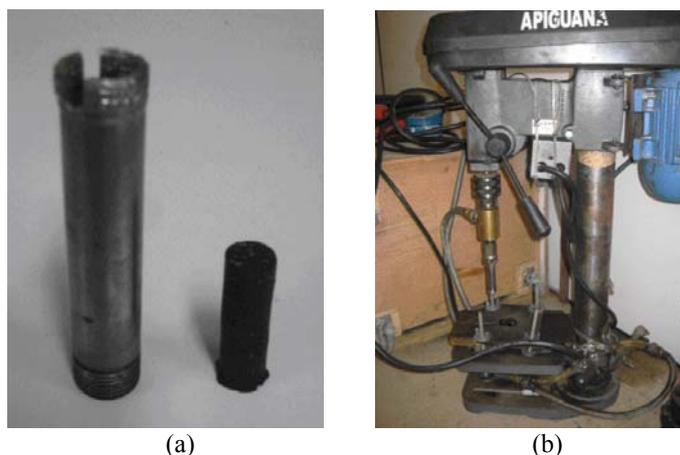


Figura 3.5. (a) Serra-copo utilizada pra extrair CP de MAF e (b) Furadeira de bancada com serra-copo.

3.2. ENSAIOS MECÂNICOS

Foram realizados três diferentes ensaios mecânicos, sendo um para cada escala (mistura completa, MAF e CAP) previamente apresentada. Estes ensaios são detalhados abaixo.

3.2.1. Ensaio de Módulo Dinâmico

Neste ensaio foram utilizados os CP's para mistura asfáltica completa. Este ensaio foi realizado na *Universal Testing Mashine 25* (UTM 25) e baseado na norma AASHTO TP 62-03. Neste ensaio é aplicada uma tensão axial compressiva na forma semi-senoidal sobre o CP a diferentes freqüências e temperaturas. As deformações axiais foram medidas por três Transformadores Diferenciais de Variáveis Lineares (*Linear Variable Differential Transformer*, LVDT) com um intervalo de posicionamento de 120° entre eles. Na Figura 3.6 pode ser observado um esquema geral deste teste.



Figura 3.6. Esquema geral do teste de módulo dinâmico.

Neste caso foram utilizadas cinco temperaturas: -10; 4,4; 21,1; 37,8 e 54,4°C e seis frequências: 25; 10; 5; 1; 0,5 e 0,1Hz. Assim, cada CP foi testado para 30 diferentes combinações de temperatura e frequência de carregamento. Este ensaio foi realizado com a temperatura variando da menor para a maior e o teste para cada temperatura foi iniciado com a maior frequência de aplicação de carga, avançando até a menor.

Para a estabilização de cada temperatura foram utilizados os tempos apresentados na Tabela 3.5 que também indica a faixa de tensão aplicada para cada temperatura. Entre cada frequência foi estabelecido um tempo de descanso de dois minutos.

Tabela 3.5. Tempo de equilíbrio da temperatura e intervalo de tensão

| Temperatura (°C) | Tempo para equilíbrio (hrs) | Intervalo de tensão (kPa) |
|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| -10,0 | 12 | 1400-2800 |
| 4,4 | 4 | 700-1400 |
| 21,1 | 3 | 350-700 |
| 37,8 | 2 | 140-250 |
| 54,4 | 1 | 35-70 |

Depois de realizada esta seqüência de procedimentos será encontrada uma deformação axial não-permanente (ε_0) para cada tensão (σ_0) aplicada. A partir daí, pode-se calcular o módulo dinâmico, $|G^*|$, pela Equação 3.1.

$$|G^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad 3.1$$

3.2.2 Reologia em Ensaios Dinâmico-Mecânicos

Para estes ensaios foi utilizado o reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamical Shear Rheometer*, DSR) modelo AR 2000®, Figura 3.7. Através deste experimento é encontrado o módulo dinâmico submetendo o CP a tensões de cisalhamento oscilatórias. Estes ensaios foram realizados com amostras de MAF e de CAP, modificando apenas os parâmetros do ensaio.



Figura 3.7. Reômetro de Cisalhamento Dinâmico AR 2000®.

Ensaios de Varredura de Freqüência para o CAP

Nestes ensaios foram utilizadas amostras de CAP convencional e modificado com SBS. Para cada um desses materiais foram feitos, em molde de silicone, dois

diferentes tipos de CP's, sendo um para ser testado a baixas temperaturas e outro para altas temperaturas. Estes CP's possuem, aproximadamente, 2mm de espessura e 8mm de diâmetro (para temperaturas abaixo de 40°C) e 1mm de espessura e 25mm de diâmetro (para temperaturas acima de 40°C). Eles foram testados em *spindles* de placas paralelas com diâmetros de, respectivamente, 8 e 25mm (Figura 3.8).

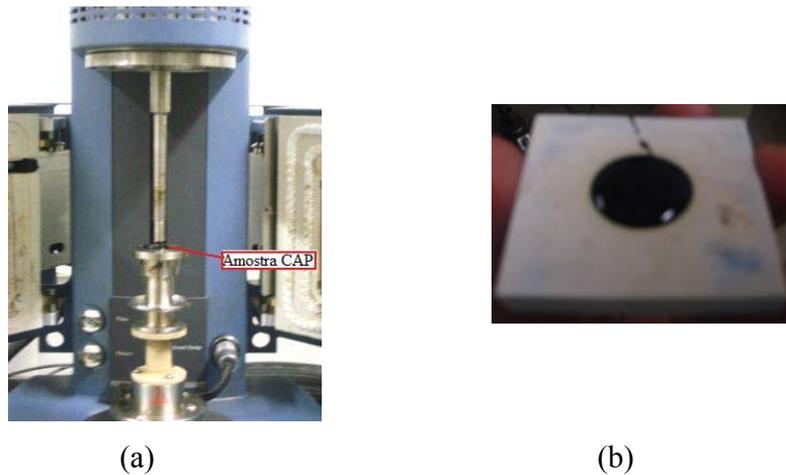


Figura 3.8. (a) CP de CAP acoplado ao DSR e (b) Amostra de CAP com 25mm de diâmetro.

Com estas amostras foram feitos ensaios de varredura de frequência (*frequency sweep*) com uma tensão controlada de 120Pa. Estes experimentos foram divididos em duas etapas, sendo a primeira realizada para temperaturas no intervalo de -10 a 40°C e a segunda para temperaturas no intervalo de 40 a 85°C. Para cada uma dessas temperaturas a frequência variou de 0,01 a 10 Hz.

Ensaio de Varredura de Frequência para o MAF

Para estes ensaios foram utilizados os CP's de MAF com dimensões de aproximadamente 12mm de diâmetro por 50mm de altura que foram previamente extraídos das amostras compactadas no Compactador Giratório Superpave (CGS). Estes CP's foram colados a discos adaptadores e em seguida acoplados ao reômetro AR 2000® (Figura 3.9). Por se tratar de um método de análise recente, não existem normas de regulamentação e, desta forma, os parâmetros deste ensaio foram baseados nos ensaios realizados com as

misturas completas e com os CAP's. Assim, foram utilizadas, sempre que possível, as temperaturas de -10, 4,4, 21,1, 37,8 e 54,4°C e a frequência variou de 0,01 a 15 Hz para cada uma dessas temperaturas. Este ensaio foi realizado à deformação controlada com o nível de deformação de $10^{-5}\mu\epsilon$.



Figura 3.9. CP de MAF acoplado no DSR.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos com a realização da metodologia de pesquisa descrita no capítulo anterior, abrangendo a interpretação e análise crítica destes resultados.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DINÂMICO

Os ensaios realizados para os CP's CP1, CP2, CP3 e CP4 foram os mesmos, com os mesmos parâmetros. Assim, o ensaio foi realizado em duplicata para cada mistura. Durante o ensaio da primeira amostra (CP1) ocorreram problemas com a fixação dos LVDT's, pois para as temperaturas de teste maiores que a ambiente a cola de fixação amoleceu e impossibilitou o ensaio. Para contornar este problema foram utilizadas ligas elásticas em torno dos LVDT's. Com este procedimento os testes foram conduzidos normalmente.

Outro problema encontrado neste ensaio foi o controle de temperatura da UTM 25. Por mais que a câmara de teste estivesse estabilizada, havia variação de temperatura durante o experimento. Isso fez com que o controle fosse feito manualmente durante alguns momentos do teste. Apesar destes contratemplos apresentados os ensaios ocorreram de forma satisfatória.

Os dois primeiros ensaios foram realizados com os CP's de misturas completa que utilizaram o CAP 50/70 convencional (CP1 e CP2). Estes ensaios forneceram valores de módulo dinâmico para cada combinação frequência-temperatura que estão apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2. Nestas Figuras observamos que, como é de se esperar, para uma determinada frequência constante, o valor do módulo decresce com o aumento da

temperatura, indicando que o material está se tornando menos rígido. Mantendo-se a temperatura constante, a magnitude do módulo dinâmico se eleva com o aumento da frequência. Isto ocorre porque à medida que a frequência aumenta, o material apresenta uma maior resposta elástica o que o torna mais rígido.

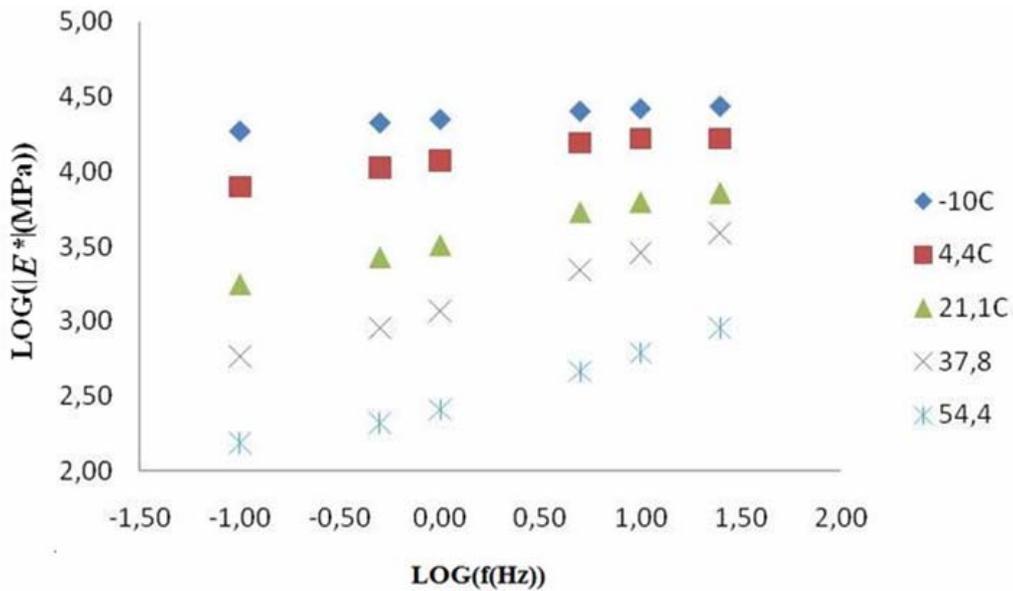


Figura 4.1. Resultado de módulo dinâmico para o CP1, mistura completa com CAP 50/70.

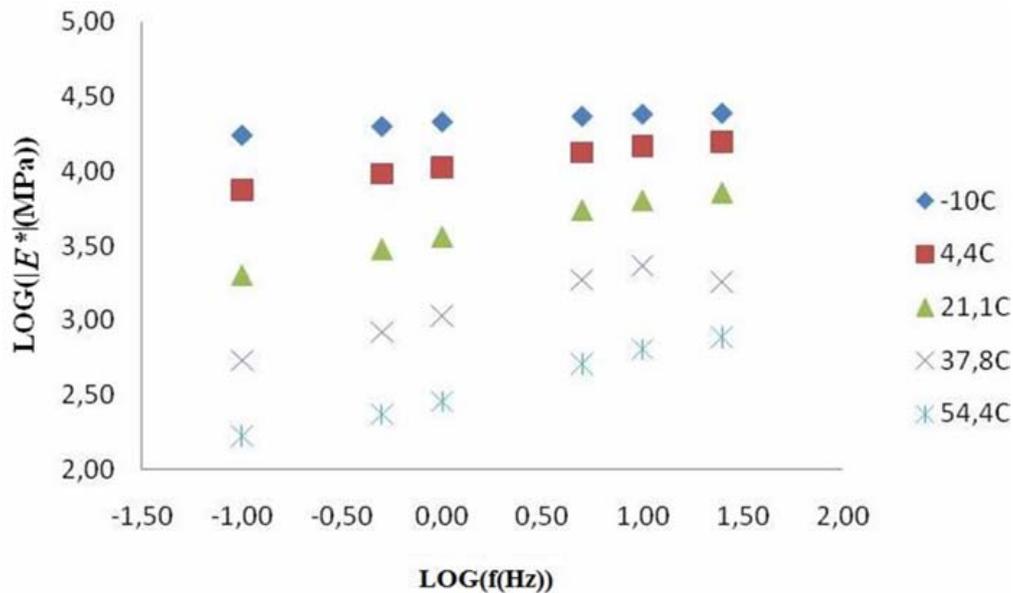


Figura 4.2. Resultado de módulo dinâmico para o CP2, mistura completa com CAP 50/70.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras acima foram construídas as curvas mestras que estão apresentadas na Figura 4.3. Para isto foi escolhido 21,1°C como a temperatura de referência e, com base nos dados de módulo dinâmico para esta temperatura, os dados das demais temperaturas foram deslocados horizontalmente. Os fatores de deslocamento, a_t utilizados neste processo foram calculados a partir da equação de Arrhenius (2.1) e estão representados na Tabela 4.1.

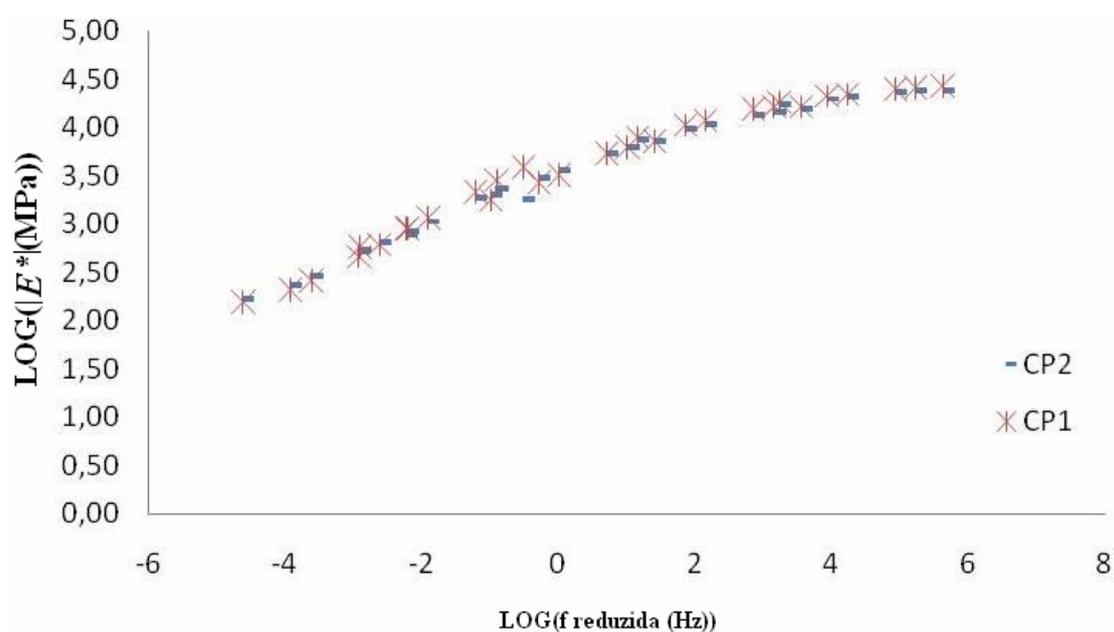


Figura 4.3. Curva mestra CP1 e CP2 (mistura completa com CAP 50/70), temperatura de referência de 21,1°C.

Tabela 4.1 - Fator de deslocamento, a_t , para misturas completas.

| Temperatura (°C) | LOG do Fator de deslocamento (a_t) | |
|------------------|--|-----------------|
| | CAP 50/70 | CAP 50/70 + SBS |
| -10,0 | 4,22 | 4,22 |
| 4,4 | 2,15 | 2,15 |
| 21,1 | 0,00 | 0,00 |
| 37,8 | -1,92 | -1,92 |
| 54,4 | -3,63 | -3,63 |

O primeiro aspecto a se observar no gráfico apresentado na Figura 4.3 é a similaridade dos dados para os dois CP's, o que nos leva a crer que os ensaios ocorreram de maneira semelhante e sem erro aparente. Outro ponto importante a ser observado é a continuidade das curvas, indicando que os fatores de deslocamento calculados a partir da equação de Arrhenius apresentaram resultados satisfatórios e que o PSTT pode ser aplicado para estes materiais. Pode-se observar ainda que para baixas frequências, o módulo cresce linearmente. A partir de um determinado valor de frequência, a rigidez do material tende a estabilizar, alcançando níveis praticamente constantes.

Para os CP's de mistura completa que utilizaram o CAP 50/70 + 4,5% SBS (CP3 e CP4), os resultados de módulo dinâmico para cada combinação frequência-temperatura estão representados nas Figuras 4.4 e 4.5. A partir destas Figuras pode-se observar que a adição do polímero SBS não modificou a tendência de comportamento da mistura. Isso porque, para uma dada temperatura, a magnitude do módulo dinâmico manteve a tendência de crescimento com o aumento da frequência e para uma determinada frequência, o valor do módulo decresceu com o aumento da temperatura.

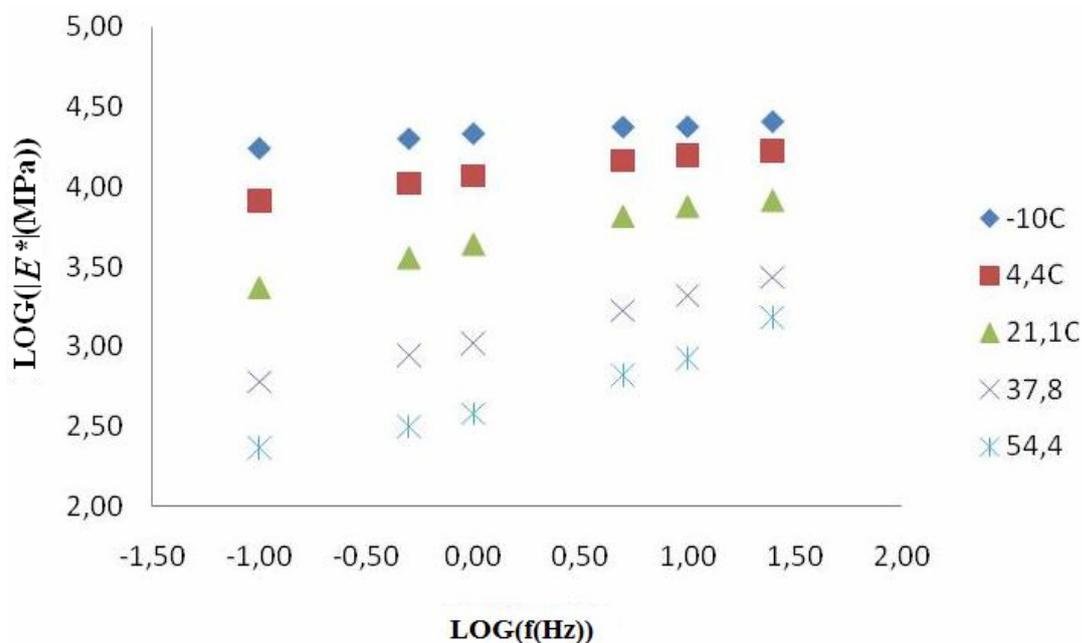


Figura 4.4. Resultado de módulo dinâmico para o CP3, mistura completa com CAP 50/70 + SBS.

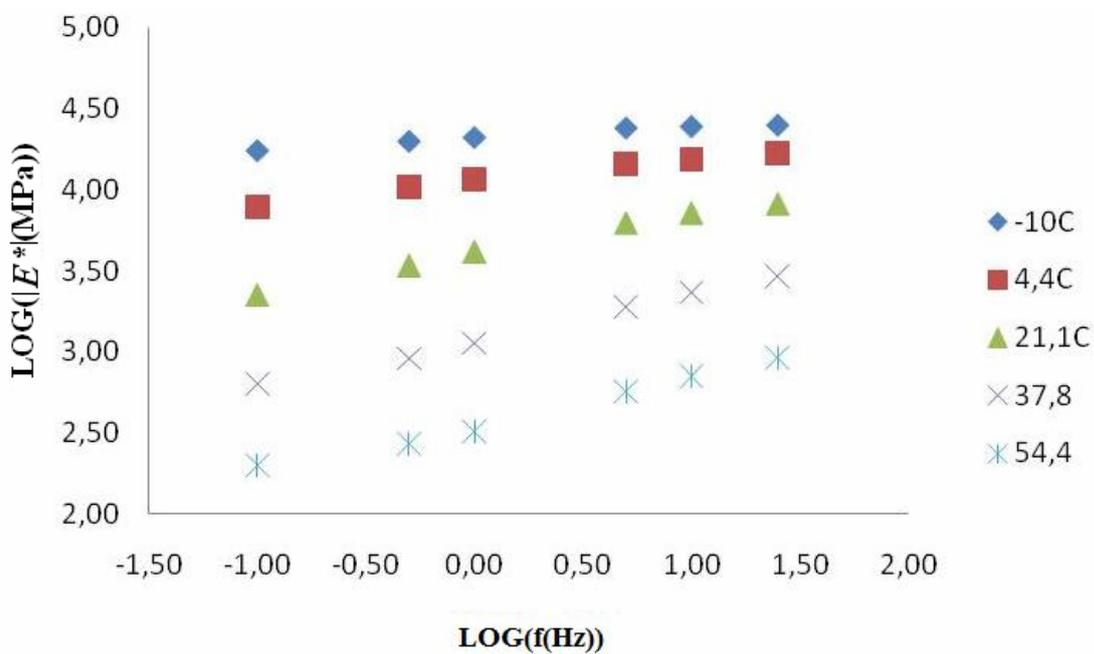


Figura 4.5. Resultado de módulo dinâmico para o CP4, mistura completa com CAP 50/70 + SBS.

A partir dos resultados apresentados nas duas Figuras anteriores foi feito o mesmo procedimento apresentado no primeiro caso e as curvas mestras para estes CP's estão representadas na Figura 4.6. As mesmas observações feitas em relação ao CP1 e CP2 podem ser realizadas aqui, ou seja, o módulo cresce linearmente para as frequências baixas e tende a permanecer constante nas frequências elevadas, indicando que a rigidez do material tende a estabilizar.

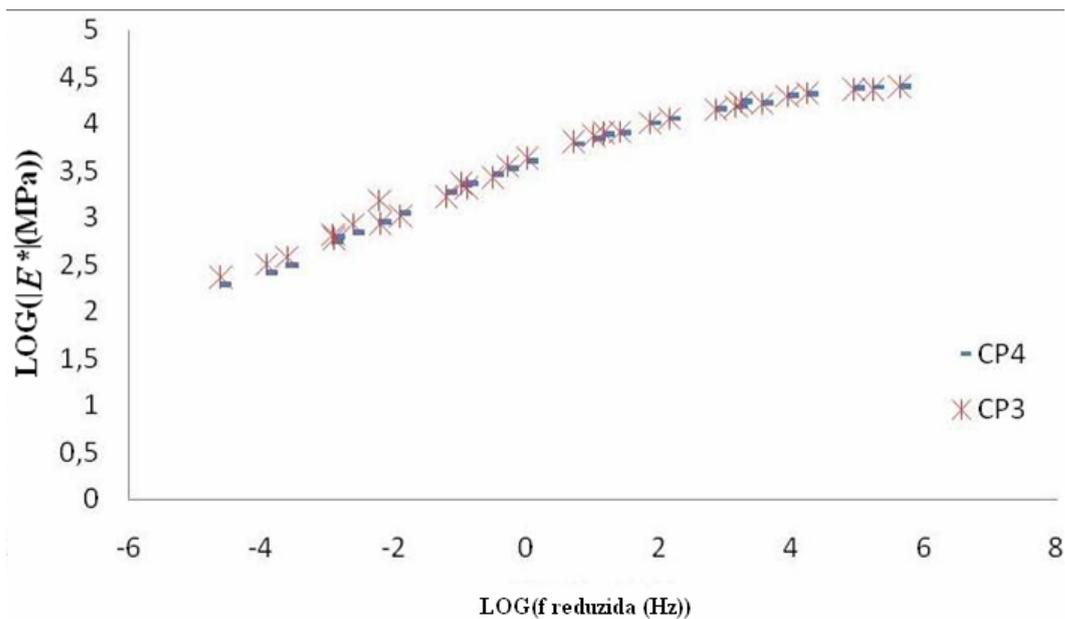


Figura 4.6. Curva mestra CP3 e CP4 (mistura completa com CAP 50/70 + SBS), temperatura de referência de 21,1°C.

Como pode ser visto nos resultados apresentados acima, o efeito da temperatura nas características viscoelásticas das misturas completas aqui estudadas foi incorporado pelo simples uso de um fator de deslocamento na escala de tempo. Com isso, pode-se considerar que o material apresenta um comportamento que pode ser aproximado como termoreologicamente simples.

4.2 ENSAIOS DE VARREDURA DE FREQUÊNCIA

4.2.1. Resultados e Análises para o CAP

Por se tratar de um ensaio totalmente automatizado foi realizado apenas um teste para cada tipo de ligante asfáltico. Os resultados para o CAP convencional e para o CAP modificado com SBS estão representados nas Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente. Para a construção destas curvas foi escolhido 20°C como a temperatura de referência. Os fatores

de deslocamento foram calculados pelo *software* TA Instruments V5.2.0[®] e são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Fator de deslocamento (a_i) para o CAP.

| Temperatura (°C) | LOG do Fator de deslocamento (a_i) | |
|------------------|--|---------------------|
| | CAP 50/70 | CAP 50/70 + 4,5%SBS |
| -10 | 3,62 | 3,63 |
| 10 | 1,26 | 1,26 |
| 20 | 0,00 | 0,00 |
| 30 | -1,14 | -1,16 |
| 40 | -2,20 | -2,22 |
| 50 | -3,09 | -3,13 |
| 60 | -3,85 | -3,87 |
| 70 | -4,52 | -4,55 |
| 80 | -5,17 | -5,22 |

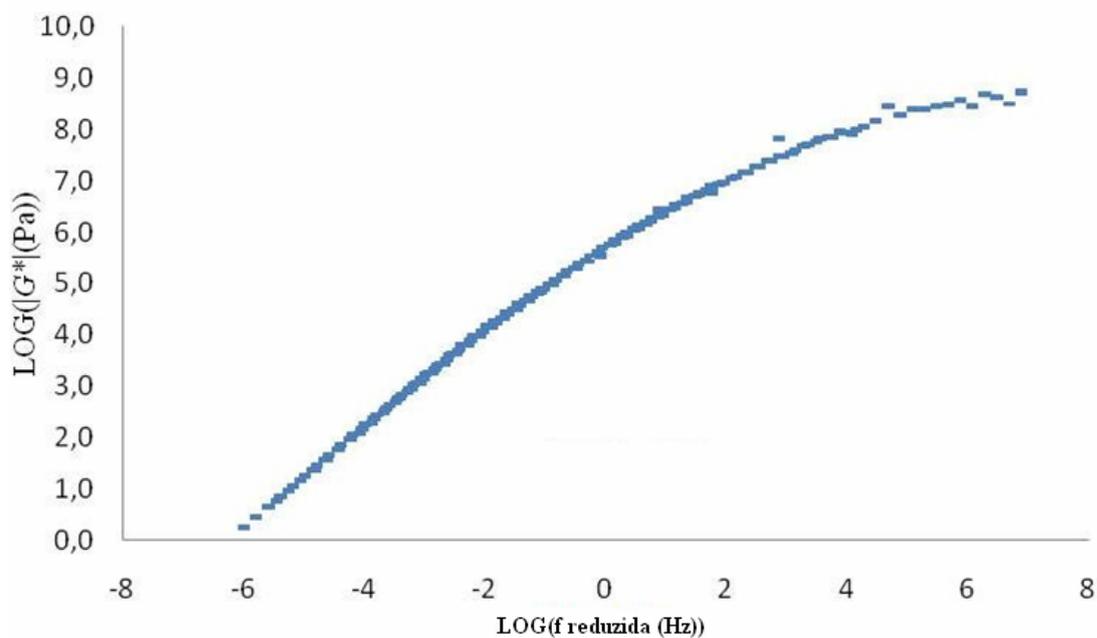


Figura 4.7. Curva mestra CAP 50/70, temperatura de referência de 20°C.

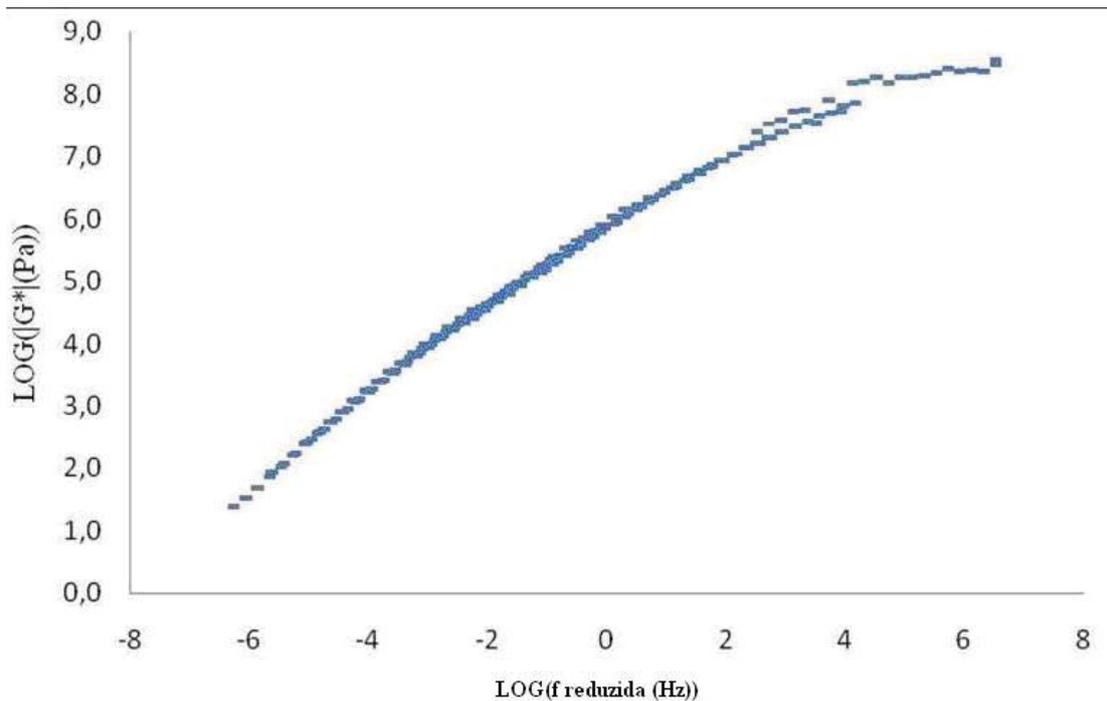


Figura 4.8. Curva mestra CAP 50/70 + 4,5% SBS, temperatura de referência de 20°C.

Assim como no ensaio anterior, a curva representada na Figura 4.7 é contínua, porém, a curva da Figura 4.8 apresenta certa descontinuidade nas frequências elevadas. Contudo, essa descontinuidade é ocasionada por poucos pontos e pode ser desprezada. Com isso, pode-se afirmar que os materiais estudados seguem o PSTT para as condições nas quais eles foram testados. Isto implica que estes materiais apresentam um comportamento que pode ser aproximado como termo-reologicamente simples.

4.2.2. Resultados e Análises para a MAF

Durante os ensaios dos CP's de MAF foram observados problemas na análise do material para temperaturas abaixo de 10°C. Quando o ensaio foi realizado para a temperatura de 4,4°C a resposta foi apresentada de maneira inconstante e sem nenhum significado físico aparente e, para a temperatura de -10°C, o ensaio foi interrompido automaticamente pelo sistema de controle do reômetro. Um provável motivo para isto ter

ocorrido é a sobrecarga do equipamento, pois para baixas temperaturas é necessário aplicar tensões elevadas para se obter um pequeno deslocamento devido ao aumento na rigidez do material.

Assim, para se obter dados suficientes para a construção de curvas mestras representativas, foram adicionadas duas temperaturas diferentes das que estavam previstas no capítulo de Materiais e Métodos, estas temperaturas são 10 e 25°C. Os resultados de módulo dinâmico para MAF com ligante convencional estão presentes na Figura 4.9 e mostram que o módulo dinâmico para a MAF tem um comportamento semelhante ao módulo da mistura completo.

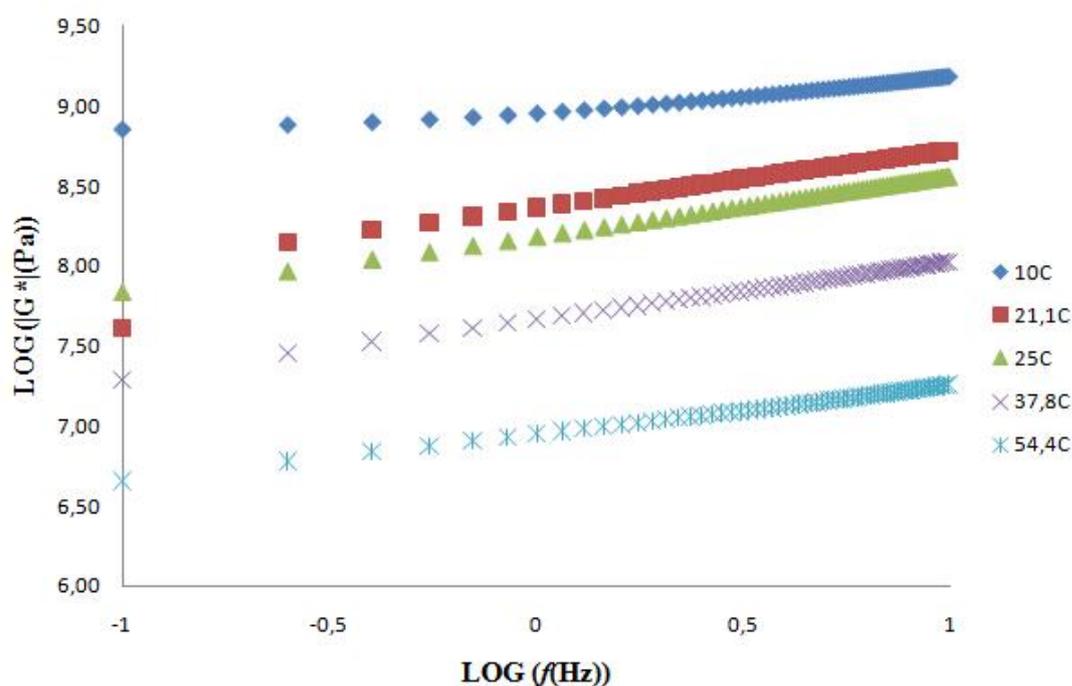


Figura 4.9. Resultado de módulo dinâmico para o CP5, MAF com CAP 50/70.

A partir destes resultados foi construída a curva mestra do CP5 para a temperatura de referência de 21,1°C (Figura 4.10). Na Tabela 4.3 estão os fatores de deslocamento (a_i) utilizados para a elaboração da curva que foram calculados pelo *software* TA Instruments V5.2.0[®].

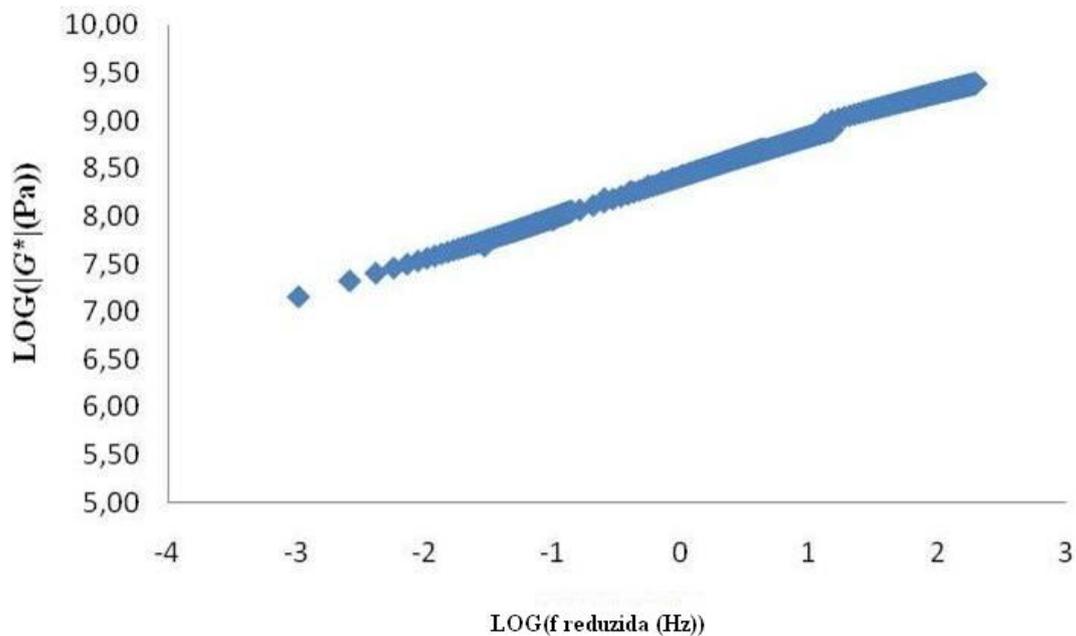


Figura 4.10. Curva mestra CP5, MAF com CAP 50/70, temperatura de referência de 21,1°C.

Tabela 4.3 - Fator de deslocamento (a_i) para a MAF

| Temperatura (°C) | LOG do Fator de deslocamento (a_i) | |
|------------------|--|----------------------|
| | CAP 50/70 | CAP 50/70 + 4,5% SBS |
| | CP5 | CP6 |
| 10,0 | 1,11 | 1,11 |
| 21,1 | 0,00 | 0,00 |
| 25,0 | -0,53 | -0,39 |
| 37,8 | -1,98 | -1,28 |
| 54,4 | -3,75 | -3,06 |

O mesmo procedimento foi realizado para a amostra de MAF com ligante modificado com SBS e os resultados dos módulos dinâmicos são apresentados na Figura 4.11. A partir destes resultados foram utilizados os fatores de deslocamento presentes na Tabela 4.3 para a construção da curva mestra apresentada na Figura 4.12. Esta curva apresenta um resultado semelhante ao do CP5, pois apresenta uma tendência de crescimento do módulo linear.

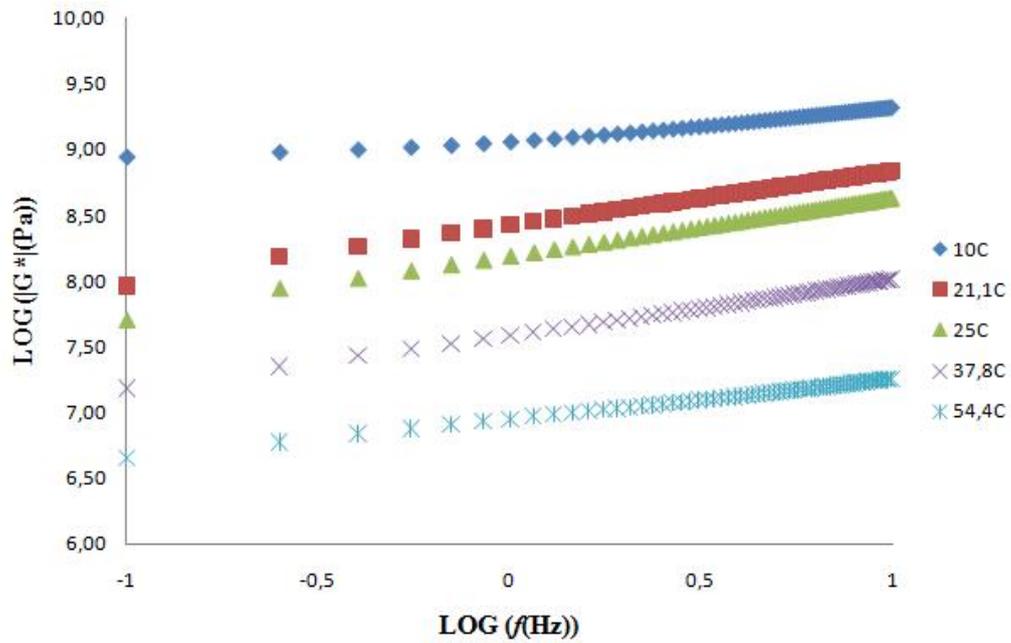


Figura 4.11. Resultado de módulo dinâmico para o CP6, MAF com CAP 50/70 + 4,5% de SBS.

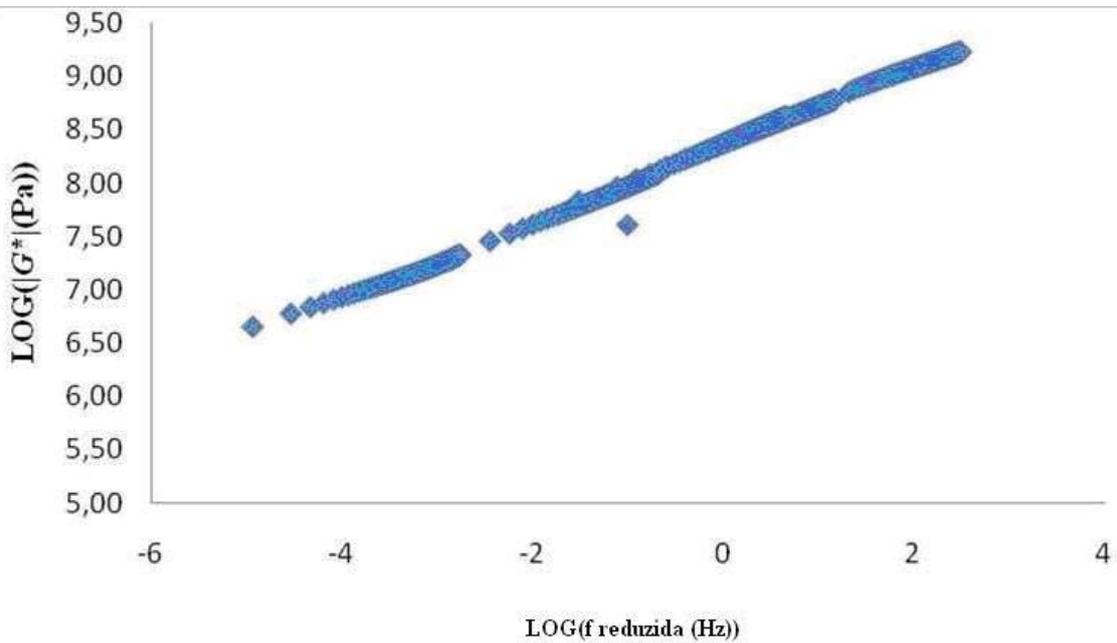


Figura 4.12. Curva mestra CP6, MAF com CAP 50/70 + 4,5%SBS, temperatura de referência de 21,1°C.

Repetindo o que ocorreu nos ensaios anteriores, as curvas representadas nas Figuras 4.10 e 4.12 são contínuas, o que indica que o PSTT também é válido para a MAF.

Ou seja, para as três escalas (mistura completa, MAF e CAP) que foram estudadas neste trabalho apresentam um comportamento que pode ser aproximado como termo-reologicamente simples. Porém, diferente do que aconteceu nas duas escalas anteriores, para o MAF os valores dos a_t foram diferentes quando se comparou a mistura com CAP convencional e aquela com o CAP modificado.

4.3 ANÁLISE DOS MATERIAIS ASFÁLTICOS COM UTILIZAÇÃO DE LIGANTE CONVENCIONAL VERSUS LIGANTE MODIFICADO

Para comparar o efeito da temperatura nos materiais asfálticos que utilizaram ligante convencional e modificado com SBS foram plotadas as Figuras 4.13, 4.14 e 4.15. Na Figura 4.13 podemos observar que o comportamento da mistura completa foi o mesmo tanto para a mistura completa com utilização do ligante convencional como para aquela que utilizou o ligante modificado com o polímero SBS. Isto significa que o agente modificador utilizado no ligante não alterou consideravelmente a rigidez da mistura asfáltica, pelo menos a ponto de ser notada nos resultados destes ensaios na escala log-log.

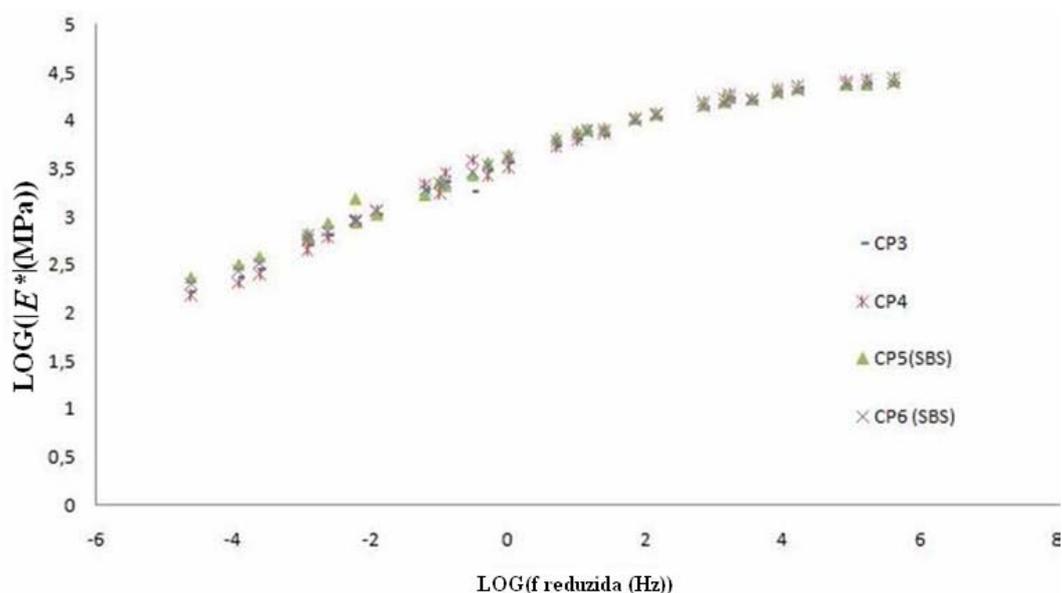


Figura 4.13. Comparação das curvas mestras de misturas completas com CAP convencional e modificado.

No caso do CAP podemos ver que (Figura 4.14) o agente modificador altera a rigidez do material para frequências baixas, isto fez com que o CAP apresentasse uma maior rigidez nesta condição de ensaio. Esta mudança na característica do material pode colaborar para que ele apresente maior resistência à deformação permanente. O mesmo não é percebido para altas frequências de carregamento.

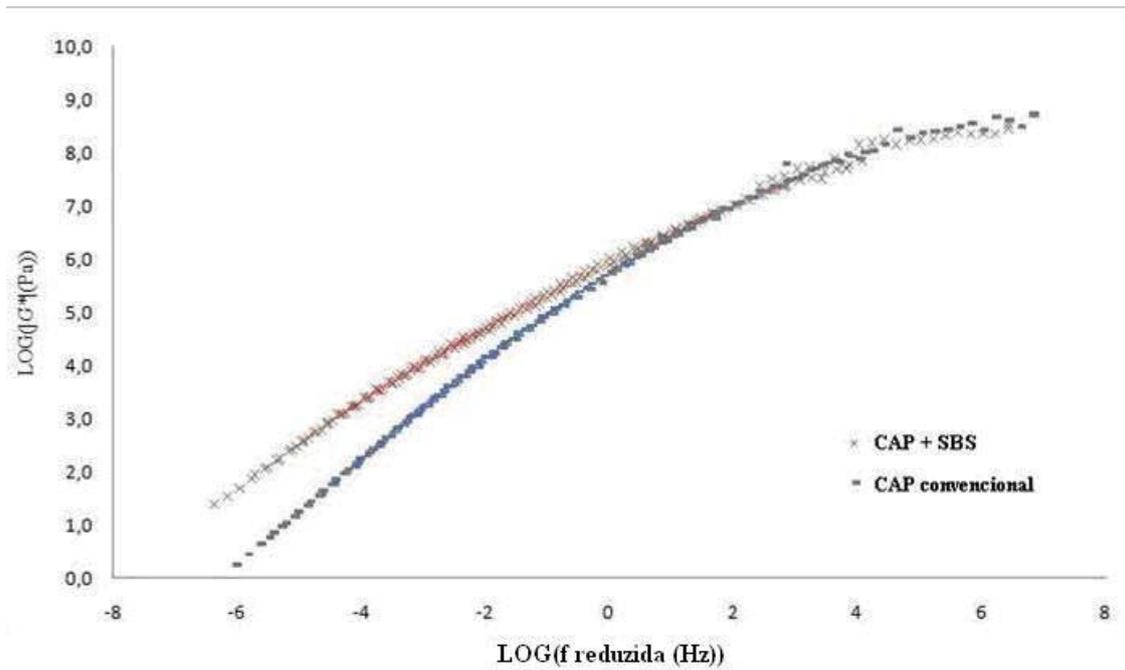


Figura 4.14. Comparação das curvas mestras de CAP convencional e modificado.

No caso das MAF's o comportamento dos dois tipos de misturas foi semelhante, assim como ocorreu para a mistura completa.

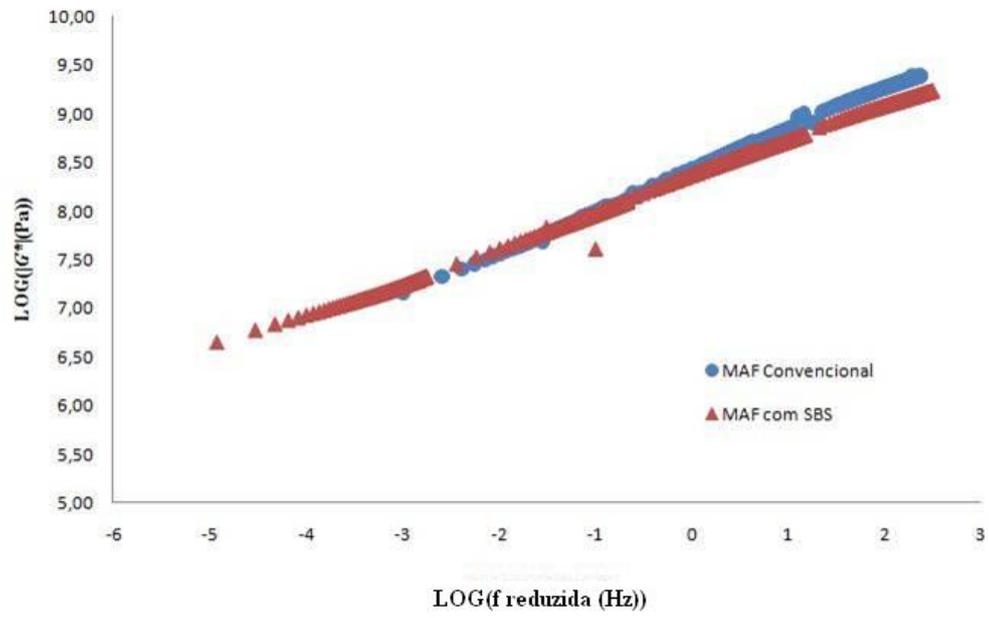


Figura 4.15. Comparação das curvas mestras de MAF com CAP convencional e modificado.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho e algumas sugestões para evolução desta linha de pesquisa.

5.1 - CONCLUSÕES

A metodologia proposta para o ensaio das amostras de MAF apresentou resultados satisfatórios, porém precisa ser melhor estudada e aprimorada. Pois, para temperaturas abaixo de 10°C os resultados não foram satisfatórios.

Também foi observado que o PSTT obteve boa aplicabilidade para as três escalas utilizadas neste trabalho. Assim, como supomos que o estudo foi realizado na zona viscoelástica linear, pode-se concluir que os materiais asfálticos estudados podem ser aproximados como termo-reologicamente simples. Quanto ao uso da equação de Arrhenius para o cálculo do fator de deslocamento das misturas completas conclui-se que os resultados foram satisfatórios.

Os resultados de módulo dinâmico indicaram que o mesmo comportamento foi observado para as três escalas estudadas. Foi observado que para uma determinada frequência constante, o valor do módulo decresce com o aumento da temperatura, indicando que o material se torna menos rígido. Caso a temperatura seja mantida constante a magnitude do módulo dinâmico é elevada com o aumento da frequência, tornando o material mais rígido.

A análise das curvas mestras dos materiais asfálticos confeccionados com utilização do ligante modificado versus convencional mostrou que o agente modificador utilizado aumentou a rigidez do CAP nas frequências baixas, o que pode indicar uma maior resistência à deformação permanente. Contudo, para a mistura completa e para a MAF o agente modificador não mostrou mudança na rigidez do material.

5.2 SUGESTÕES

A dosagem da MAF necessita ser melhor estudada no que diz respeito ao volume de vazios. Uma alternativa para isto seria realizar análises tomográficas em CP's de mistura completa a fim de encontrar um volume de vazios representativo para ser utilizado nesta dosagem. No que diz respeito ao ensaio de módulo dinâmico das amostras de MAF, muito resta a ser feito. Um estudo detalhado da melhor forma de conduzir este ensaio deve ser elaborado. Deve-se investigar a causa deste ensaio não obter êxito para temperaturas abaixo de 10°C. Uma possível alternativa para contornar este problema é realizar o ensaio à tensão controlada, ao invés de à deformação controlada.

Outro ponto importante para a continuidade deste trabalho é realizar o estudo das três escalas de forma conectada, isto facilitaria o entendimento do comportamento de materiais asfálticos. Para isso seria importante investigar uma forma de comparar os resultados de módulo dinâmico cisalhante (ensaios do CAP e da MAF) com os resultados de módulo dinâmico axial (ensaios da mistura completa). Também seria importante aumentar a amostragem das análises realizadas e realizar os mesmos ensaios para avaliar o ângulo de fase dos materiais e investigar o efeito de diferentes metodologias na obtenção da curva mestra.

Por último é sugerida a realização deste mesmo estudo para diferentes tipos de materiais asfálticos, tendo em vista que existem evidências na literatura que alguns ligantes modificados se comportam como termo-reologicamente complexos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) NBR 9935: Agregados. Rio de Janeiro.
- AIREY, G.D. (2003) Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens. *Fuel* 82, 1709-1719.
- AASTHO TP 62-03 (2005) Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures.
- BEER, F.P.; JOHNSTON Jr., E. R. (1996) Resistência dos Materiais. 3ª Edição. Pearson Education. São Paulo – SP.
- BERNUCCI, L.L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. (2007) Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro - RJ.
- CASTELO BRANCO, V.T.F. (2008) A Unified Method for the Analysis of Nonlinear Viscoelasticity and Fatigue Cracking of Asphalt Mixtures Using the Dynamic Mechanical Analyzer. Tese de doutorado – Texas A&M University, Engenharia Civil, Estados Unidos, Texas.
- CHEUNG, C.Y. (1995) Mechanical Behavior of Bitumens and Bituminous Mixtures. Tese de Doutorado – University of Cambridge, UK, Cambridge.
- CHRISTENSEN, R.M. (1982) Theory of Viscoelasticity. Dover, New York - NY, USA, 2ª Edição.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura em Transportes (2005). DNER- ME 035/95: Peneiras de Malhas Quadradas para Análise Granulométrica de Solos. Rio de Janeiro - RJ.
- ELSEIFI, M.A.; AL-QADI, I.L.; YOO, P.J. (2006) Viscoelastic Modeling and Field Validation of Flexible Pavements. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 132, No 2, 172-178.
- EVANGELISTA, Jr, F., PARENTE Jr, E.; SOARES, J.B, (2005) Viscoelastic and Elastic Structural Analysis of Flexible Pavements. In XXVI Iberian Latin-American

- Congress Computational Methods in Engineering (CILAMCE), Guarapari - ES.
- HUANG, Y.H. (2004) Pavement Analysis and Design. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ, EUA.
- KLOMPEN, E.T.J.; GOVAERT, L.E. (1999) Nonlinear Viscoelastic Behaviour of Thermorheologically Complex Materials. Mechanics of Time-Dependent Materials, Vol. 3, No 1, p. 49-69.
- LAKES, R.S. (1998) Viscoelastic Solids. CRC Press.
- LU, Y.; WRIGHT, P. (2000) Temperature Related Visco-Elastoplastic Properties of Asphalt Mixtures. Journal of Transportation Engineering, Vol. 16, No 1, 58-65.
- MEDANI, T.O., HUURMAN, M. (2003). Constructing the Stiffness Master Curves for Asphaltic Mixes. ISSN 0169-9288.
- MULIANA, A.; KHAN, K.A. (2008) A Time-Integration Algorithm for Thermo-Rheologically Complex Polymers. Computational Materials Science. Vol. 41, pp. 576-588.
- OLIVEIRA, J.D.; CABRAL, A.E.B; CASTELO BRANCO, V.T.F; BARROSO, S.H.A. (2009) Estudo da Reutilização de Resíduos de Construção e Demolição como Agregado em Misturas Asfálticas. IV SINAPRE, Fortaleza, CE.
- PETROBRAS. (2009) Certificado de Ensaio – Cimento Asfáltico 50/70.
- PORTELA, E.L. (2008) Algoritmo para Análise de Tensões em Materiais Viscoelásticos. Unidimensionais. Trabalho de Final de Curso - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE.
- POLACCO, G.; MUSCENTE, A.; BIONDI, D.; SANTINI, S. (2006) Effect of Composition on the Properties of SEBS Modified Asphalts. European Polymer Journal, Vol.42, p.1113-1121.
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN E.R.; LEE D.Y.; KENNEDY T.W. (1996) Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, 2ª edição Lanham, Maryland.

- ROYLANCE, D. (2001) Engineering Viscoelasticity. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge - MA.
- SHAMES, I.H.; COZZARELLI, F.A. (1997) Elastic and Inelastic Stress Analysis. Taylor & Francis, Revised Printing.
- SENGOZ B.; TOPAL A.; ISIKYAKAR G.; (2009) Morphology and Image Analysis of Polymer Modified Bitumens. Construction and Building Materials, v.23, 1986-1992.
- SENGOZ, B.; ISIKYAKAR, G. (2008) Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen. Construction and Building Materials, v.22, 1897-1905.
- SOARES, J.B.; e SOUZA, F. (2002) Verificação do Comportamento Viscoelástico Linear em Misturas Asfálticas. Anais do Instituto Brasileiro de Gás e Petróleo – IBP.
- SOUZA, P.C. (2007) Métodos para a Sistematização da Produção e Ensaio de Corpos de Prova de Mástique. Trabalho de Final de Curso – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- YILDIRIM, Y. (2007) Polymer Modified Asphalt Binders. Construction and Building Materials, v. 21, 66-72.
- WOODS, K.B. (1960) Highway Engineering Handbook. New York - NY.